

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI – COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RAQUEL PEDROSO DIAS

**ANÁLISE DOS MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE ESFORÇOS
DE CISALHAMENTO EM PEÇAS DE CONCRETO ARMADO
CONVENCIONAL E REFORÇADAS COM FIBRAS DE AÇO E PVA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO

2019

RAQUEL PEDROSO DIAS

**ANÁLISE DOS MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE ESFORÇOS
DE CISALHAMENTO EM PEÇAS DE CONCRETO ARMADO
CONVENCIONAL E REFORÇADAS COM FIBRAS DE AÇO E PVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Savaris

TOLEDO

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 232

Estudo dos mecanismos de transferência de esforços de cisalhamento em peças de concreto armado convencional e reforçadas com fibras de aço e PVA

por

Raquel Pedroso Dias

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 13:50h do dia **13 de novembro de 2019** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof. Me. Jorge Augusto Wissmann
(UNIOESTE – CASCAVEL)

Prof. Dr. Rodnny Jesus Mendoza Fakhye
(UTFPR – TD)

Prof. Dr. Gustavo Savaris
(UTFPR – TD)
Orientador

Visto da Coordenação
Prof. Dr. Fúlvio Natércio Feiber
Coordenador da COECI

Dedico este trabalho a minha amada mãe,
Alaide Helena Dias, minha maior incentivadora
e a grande responsável por fazer com que tudo
isso se tornasse possível.

AGRADECIMENTOS

Evidentemente esses poucos parágrafos de agradecimentos não farão jus a todas as pessoas que fizeram parte dessa fase da minha vida. Assim sendo, já deixo meu pedido de desculpas àqueles que não serão mencionados, mas que estiveram presentes e fizeram a diferença durante esta trajetória.

Minha gratidão acima de tudo a Deus, que me proporcionou a oportunidade e as condições de estar aqui. Muito obrigada por Teu cuidado e amparo nos momentos mais difíceis.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Gustavo Savaris, pela sua orientação, disponibilidade e auxílio durante todas as etapas desse trabalho e por todo o conhecimento transmitido durante suas aulas.

Também deixo registrado meu agradecimento à banca avaliadora pela avaliação e contribuição. A todo corpo docente e técnico da UTFPR, em especial aos técnicos Marcos e Wilson por todo auxílio laboratorial e aos professores Lucia Bressiani e Rodnny Jesus Mendoza Fakhye por me fazerem pensar além do “academicamente necessário” e retratarem ótimos exemplos de profissionais.

Ao Tiago Romancini por disponibilizar o aditivo superplastificante, à Coneresuper pela doação de agregados e fibras de aço, e ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra pela doação das fibras de PVA.

Meu agradecimento especial a todos os amigos que fiz durante o curso e que me acompanharam nessa jornada, em especial ao Fernando, Lays, Eduardo, Iasmin, Gustavo, Luiz Felipe e Sara. A todos os meus amigos externos ao ramo, muito obrigada pela paciência, compreensão e por me darem todo o suporte e apoio que estavam em seu alcance, em especial à minha irmã de alma Milena L. Groeler e ao Andrei, Maiara, Thiago, Emily, Mariana, Julia, Sarah, Alyne e Rebeca.

Muito obrigada ao meu amigo e supervisor Gabriel Andrade Carvalho por todo o conhecimento transmitido, paciência, compreensão e humildade.

E sobretudo, a minha mãe Alaide Helena Dias. Não existem palavras que consigam expressar minha eterna gratidão por tudo que fez e faz por mim. Todo meu amor é seu.

"Importante não é ver o que ninguém nunca viu, mas sim, pensar o que ninguém nunca pensou sobre algo que todo mundo vê"

(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

DIAS, Raquel P. **Análise dos mecanismos de transferência de esforços de cisalhamento em peças de concreto armado convencional e reforçadas com fibras de aço e PVA**. 2019. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2019.

Apesar de ser o material mais empregado na construção civil, ainda existem dificuldades em estimar a resistência ao cisalhamento do concreto armado, principalmente quando fibras são utilizadas. O presente estudo analisa a resistência última ao cisalhamento e os mecanismos de coesão, engrenamento dos agregados, atrito e efeito de pino na transferência desses esforços. Quatro traços de concreto foram utilizados, sendo CC1 um concreto convencional com brita 1, CC0 um concreto convencional com brita 0, CRFA um concreto reforçado com 0,5% de fibras de aço e CRF-PVA um concreto reforçado com 0,5% de fibras de PVA. Foram moldados 24 corpos de prova cilíndricos para determinar as resistências à compressão, tração e módulo de elasticidade e 12 corpos de prova do modelo *push-off* para os ensaios de cisalhamento direto, sendo três para cada traço, possuindo como variante a presença de armadura longitudinal, sua condição de aderência e a DMC do agregado graúdo utilizado. Os resultados mostraram que a adição de fibras de aço conferiu um acréscimo significativo na resistência à compressão, tração e cisalhamento do concreto, enquanto as fibras de PVA aumentaram a resistência à compressão, porém não apresentaram incremento de resistência ao cisalhamento nem à tração. Analisando a variação proporcional de um corpo de prova para outro do mesmo traço é possível visualizar que a presença de fibras interfere negativamente na aderência da barra de aço com o concreto. Os resultados dos concretos convencionais foram comparados com algumas expressões empíricas, tendo os mesmos se localizado dentro da faixa de resistência esperada.

Palavras-chave: Cisalhamento, *Push-off*, Fibras, Efeito de pino.

ABSTRACT

DIAS, Raquel P. **Analysis of shear stress transfer mechanisms in reinforced concrete pieces and reinforced with steel and PVA fibres.** 2019. 79 f. Monograph – Civil Engineering. Federal University of Technology – Paraná – Brazil. Toledo, 2019.

Despite being the most used material in construction, there are still difficulties in estimating the shear strength of reinforced concrete, especially when fibers are used. The present study analyzes the ultimate shear strength and cohesion, aggregate interlock, friction and dowel action mechanisms in the transfer of these forces. Four concrete mix ratios were used: CC1 a conventional concrete with gravel 1, CC0 a conventional concrete with gravel 0, CRFA a concrete reinforced with 0.5% steel fibers and CRF-PVA a concrete reinforced with 0.5% PVA fibers. Twenty-four cylindrical specimens were molded to determine compressive, traction and elastic modulus strengths and 12 push-off specimens for direct shear tests, three for each trait, with as a variant the presence of longitudinal reinforcement, its adherence condition and the characteristic maximum diameter of the coarse aggregate used. The results showed that the addition of steel fibers provided a significant increase in the compressive strength, traction and shear strength of the concrete, while the PVA fibers increased the compressive strength, but did not increase the shear or traction strength. Analyzing the proportional variation from one specimen to another of the same mix ratio, it can be seen that the presence of fibers negatively interferes with the adherence of the steel bar with the concrete. The results of conventional concretes were compared with some empirical expressions, having been located within the expected resistance range.

Keywords: Shear, Push-off, Fibers, Dowel action.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mecanismo de transferência de tensões em peças fissuradas de concreto convencional e reforçado com fibras	19
Figura 2 – Comportamento da carga de arrancamento em fibra reta (Estágios 1 ao 3) e fibra com gancho na extremidade (Estágios 1 ao 5)	21
Figura 3 – (a) Curva Tensão x Deformação de um ECC (SPECC) submetido a tração uniaxial em comparação a CC (PC) e CRFA (FRC); (b) Fissuração múltipla num ECC submetido à tração uniaxial	22
Figura 4 – Teoria atrito-cisalhamento	25
Figura 5 – Estrutura geralmente observada em um plano fissurado de concreto convencional	27
Figura 6 – Capacidade de transferir tensões de cisalhamento em função do deslocamento para cada mecanismo	33
Figura 7 – Métodos de teste para a avaliação da resistência ao cisalhamento do concreto; (a) Push-off; (b) JSCE; (c) FIP	34
Figura 8 – Esquematização e instrumentação padrão de um ensaio do modelo <i>Push-off</i>	35
Figura 9 – Esquematização e instrumentação padrão de um ensaio do modelo JSCE SF6	36
Figura 10 – Esquematização e instrumentação padrão de um ensaio do modelo da FIP	36
Figura 11 - Fibra de aço da Wirand modelo FF1 da Wirand®	38
Figura 12 – Fibra de PVA da Kuraray modelo KURALON RF400	39
Figura 13 – Dimensão do corpo de prova utilizado no ensaio <i>Push-off</i>	41
Figura 14 – Montagem e locação parcial da forma e armadura do modelo <i>Push-off</i>	41
Figura 15 – Primeira variação do corpo de prova prismático do modelo <i>Push-off</i> (C1)	42
Figura 16 – Segunda variação do corpo de prova prismático do modelo <i>Push-off</i> (C2)	42
Figura 17 – Terceira variação do corpo de prova prismático do modelo <i>Push-off</i> (C3)	43
Figura 18 – Formas concretadas dos traços (a) CC1, CC0, (b) CRFA e CRF-PVA	44
Figura 19 – Instrumentação do ensaio de cisalhamento direto	45

Figura 20 – Ensaio do abatimento do tronco de cone para (a) CC1, (b) CC0, (c) CRFA e (d) CRF-PVA	47
Figura 21 – Resistências à compressão normalizadas em pesquisas envolvendo CRFA.....	49
Figura 22 – Corpos de prova dos traços (a) CCO e (b) CRFA após o ensaio de tração por compressão diametral	51
Figura 23 – Corpo de prova CC1-C3 após ensaio de cisalhamento direto	53
Figura 24 – Interfaces cisalhadas dos corpos de prova (a) CC1-C1, (b) CC0-C1, (c) CRFA-C1 e (d) CRFA-PVA-C1.....	54
Figura 25 – Fissuras geradas pela flexão no corpo de prova CC1-C2.....	55
Figura 26 – (a) Deslizamento vertical, (b) abertura de fissuras e (c) deslocamento total	55
Figura 27 – Abertura de fissuras dos corpos de prova dos traços (a) CC1, (b) CC0, (c) CRFA e (d) CRF-PVA.....	56
Figura 28 – Abertura de fissuras dos corpos de prova das variações (a) C1, (b) C2 e (c) C3.....	57
Figura 29 – Deslocamento total dos corpos de prova dos traços (a) CC1, (b) CC0, (c) CRFA e (d) CRF-PVA.....	57
Figura 30 – Tendência de rotação do corpo de prova quando submetido à flexão ...	58
Figura 31 – Resistências últimas ao cisalhamento.....	59
Figura 32 – Comparativo entre a variação proporcional das resistências ao cisalhamento	59
Figura 33 – Comparação entre as tensões normalizadas dos corpos de prova do tipo (a) C1, (b) C2 e (c) C3.....	62
Figura 34 – Comparativo dos resultados com (a) autores que utilizaram a metodologia <i>Push-off</i> e (b) autores que propuseram equações empíricas.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas e Mecânicas da fibra Wirand® FF1	39
Tabela 2 – Propriedades físicas e Mecânicas da fibra KURALON™ RF400.....	39
Tabela 3 – Quantidade de materiais necessários para a produção de 1 m ³ de concreto	40
Tabela 4 – Quantidade de materiais utilizados para a produção de 45 litros de concreto	44
Tabela 5 – Caracterização dos agregados.....	46
Tabela 6 – Resultados da determinação da consistência através do <i>Slump test</i>	47
Tabela 7 – Propriedades características dos concretos	49
Tabela 8 – Tensões cisalhantes últimas.....	51
Tabela 9 – Variação proporcional das resistências ao cisalhamento	59
Tabela 10 – Tensão de cisalhamento normalizada	61
Tabela 11 – Tensões de cisalhamento últimas obtidas pelas equações empíricas e experimentalmente	64
Tabela 12 – Resultados individuais dos ensaios de compressão axial	75
Tabela 13 – Resultados individuais dos ensaios de tração por compressão diametral	75

LISTA DE SIGLAS

ACI	<i>American Concrete Institute</i> – Instituto Americano de Concreto
ARI	Alta Resistência Inicial
CC	Concreto Convencional
CP	Cimento Portland
CRF	Concreto reforçado com fibras
CRFA	Concreto reforçado com fibras de aço
CRF-PVA	Concreto reforçado com fibras de PVA
DMC	Dimensão Máxima Característica
ECC	<i>Engineered Cementitious Composites</i> – Compósitos Cimentícios de Engenharia
FIP	<i>Fédération Internationale de La Précontrainte</i> – Federação Internacional de Protensão
FRC	<i>Fiber Reinforced Concrete</i> (Concreto reforçado com fibras)
ITZ	<i>Interface Transition Zone</i> – Zona de Transição de Interface
JSCE	<i>Japan Society of Civil Engineers</i> – Sociedade Japonesa de Engenheiros Civis
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i> – Placa de fibra em média densidade
NBR	Norma Brasileira
PVA	Álcool Polivinílico
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

τ	Tensão de cisalhamento
c	Coesão
σ	Tensão normal ao plano de cisalhamento
ϕ	Ângulo de atrito interno
f_c	Resistência à compressão
f_t	Resistência à tração
τ_u	Tensão de cisalhamento última
ρ_w	Taxa de armadura geométrica
f_y	Tensão de escoamento da armadura transversal
σ_n	Tensão normal atuante
V_u	Força cortante horizontal última
T_u	Força de tração última na armadura
$\tan \phi = \mu$	Coefficiente de atrito
A_{sw}	Área da armadura transversal
w	Abertura da fissura
s	Deslocamento paralelo à interface cisalhada
C_f	Fator de efetividade do agregado
τ_{ad}	Tensão de cisalhamento suportada pela aderência
τ_{at}	Tensão de cisalhamento suportada pelo atrito
τ_{ag}	Tensão de cisalhamento suportada pelo engrenamento dos agregados
τ_w	Tensão de cisalhamento suportada pelo efeito de pino
τ_n	Tensão de cisalhamento normalizada
τ_u	Tensão de cisalhamento última
$f_{cm,k}$	Resistência à compressão característica média
$f_{tm,k}$	Resistência à tração característica média

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVO GERAL	17
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.4 DELIMITAÇÃO DO TEMA	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS	18
2.1.1 Interação fibra-matriz	19
2.1.2 Concreto reforçado com fibras de aço (CRFA)	20
2.1.3 Concreto reforçado com fibras de PVA (CRF-PVA)	21
2.2 TENSÕES CISALHANTES EM ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO	23
2.2.1 Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb	23
2.2.2 Teoria atrito cisalhamento	24
2.3 TRANSFERÊNCIA DAS TENSÕES DE CISALHAMENTO EM INTERFACES DE CONCRETO	26
2.3.1 Coesão e Engrenamento dos Agregados	27
2.3.2 Efeito de Pino	30
2.3.3 Atrito	31
2.3.4 Interação	32
2.4 METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE ESFORÇOS DE CISALHAMENTO	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS	37
3.1.1 Aglomerante	37
3.1.2 Agregados	38
3.1.3 Fibras	38

3.1.4 Aditivo	39
3.2 TRAÇOS UTILIZADOS	40
3.3 ESPECIFICAÇÕES DOS CORPOS DE PROVA	40
3.4 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS	43
3.5 INSTRUMENTAÇÃO E EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	46
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO	47
4.2.1 Propriedades do concreto no estado fresco	47
4.2.2 Propriedades do concreto no estado endurecido	48
4.3 RESISTÊNCIAS AO CISALHAMENTO	51
4.4 DESLOCAMENTOS.....	55
4.5 ANÁLISE DOS MECANISMOS	58
4.6 COMPARATIVO COM A BIBLIOGRAFIA	61
4.6.1 Tensões de cisalhamento normalizadas	61
4.6.2 Comparativo com a bibliografia existente e equações empíricas para concretos convencionais.....	63
5 CONCLUSÕES	65
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
APÊNDICE A – FORMAS E ARMADURAS DAS TRÊS VARIAÇÕES <i>PUSH-OFF</i>.	73
APÊNDICE B – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS	74
APÊNDICE C – RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL E TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	75
APÊNDICE D – LEITURAS DE DESLOCAMENTO DO MEDIDOR DA ESQUERDA E DO MEDIDOR DA DIREITA.....	76
APÊNDICE E – INFORMAÇÕES DETALHADAS DOS TESTES INCLUÍDOS NA AVALIAÇÃO COMPARATIVA	77

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é uma área caracterizada por possuir uma vasta gama de materiais e metodologias de dimensionamento, sendo o concreto um dos materiais mais empregados nesta indústria devido a sua alta resistência à compressão, facilidade de manuseio e boa resistência a condições ambientais agressivas. Entretanto, apesar de sua grande utilização, este material apresenta algumas limitações de uso em virtude de sua baixa resistência à tração, alta fissuração, baixa resistência pós-fissuração e comportamento frente às situações de fadiga.

Dentre os inúmeros melhoramentos atualmente aplicáveis no concreto, o reforço com fibras (CRF) vem sendo utilizado em calçadas, túneis, estradas, aeroportos e estacionamentos, pois resulta na melhora das resistências à tração e flexão, aumento da absorção de energia e melhora na ductilidade. De acordo com Ghasemi, Ghasemi e Mousavi (2018), essas melhorias advindas da adição de fibras ainda não possuem um modelo de quantificação, pois dependem de diversos fatores como a orientação das fibras e sua capacidade de aderência à matriz cimentícia.

A falta de padrões e modelos de análise não é exclusiva apenas em CRF, mas ocorre também com a resistência ao cisalhamento de elementos de concreto. Desde a Teoria Atrito-cisalhamento, proposta por Birkeland e Birkeland (1966), houve um crescimento no número de estudos e linhas de pesquisas que visam compreender este fenômeno em sua totalidade. Em virtude da falta de uma formulação padrão para análise de peças de concreto submetidas ao cisalhamento, as metodologias existentes são baseadas em formulações empíricas, que correlacionam à resistência do concreto ao cisalhamento apenas à resistência do concreto à compressão, desconsiderando as demais características do material (RUIZ; MUTTONI; SAGASETA, 2015; SOETENS; MATTHYS, 2017).

Apesar de não existir um consenso sobre todos os mecanismos que interferem na resistência ao cisalhamento, é de comum acordo que o efeito de pino possui grande influência nesse fenômeno. Com as atuais tecnologias e novas metodologias de pesquisa, vem se buscando uma análise mais minuciosa acerca deste mecanismo, causado pela armadura longitudinal, possuindo relação direta com a aderência desta armadura com a matriz cimentícia.

Dessa maneira, o presente trabalho buscou avaliar a resistência ao cisalhamento de peças de concreto armado convencional e reforçadas com fibras, a fim de avaliar a influência de alguns mecanismos no fenômeno de resistência e transferência de esforços no cisalhamento. Essa análise foi realizada utilizando a metodologia *Push-off* e corpos de prova produzidos com quatro diferentes misturas de concreto, que possuíam como variantes o teor de fibras de aço e PVA, as armaduras transversais com e sem contato com a matriz cimentícia e alteração da DMC da brita utilizada.

1.1 JUSTIFICATIVA

Apesar do grande número de estudos a respeito da eficácia da adição de fibras ao concreto, a análise dos mecanismos de resistência ao cisalhamento ainda carece de pesquisas, a fim de estabelecer a influência de cada um dos parâmetros na resistência do material.

Esse déficit de estudos nessa área se reflete nas formulações empíricas propostas pela maioria dos autores e normas nacionais e internacionais (ACI (2019), Eurocode 2 (2004) e NBR 6118 (2014)), fazendo com que apenas a resistência à compressão do concreto e a taxa de armadura transversal sejam levadas em conta no dimensionamento e verificação, desconsiderando as demais características do traço e o tipo de agregado utilizado.

Além disso, as pesquisas acerca do assunto consideram e mensuram o efeito de pino em situações convencionais, ou seja, com aderência entre a barra de aço e a matriz de cimento. A análise de cada mecanismo isolado e em conjunto com os demais, como apresentado neste trabalho, faz com que o fenômeno seja melhor entendido.

1.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar o comportamento dos mecanismos de efeito de pino, engrenamento dos agregados, coesão e atrito na resistência ao cisalhamento de peças de concreto convencional e reforçadas com fibras de aço e PVA.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar as propriedades mecânicas de uma dosagem de concreto convencional com outros com adição de fibras de aço e PVA;
- Avaliar o efeito da aderência da armadura à matriz de concreto na resistência ao cisalhamento;
- Avaliar o efeito da adição de fibras na deformação e abertura de fissuras de peças de concreto submetidas ao cisalhamento;
- Verificar se a utilização de fibras interfere nas condições de aderência da armadura transversal.

1.4 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O presente trabalho foi focado em um estudo teórico experimental, avaliando a resistência ao cisalhamento de peças de concreto convencional e reforçadas com fibras, a fim de analisar a influência de alguns mecanismos no fenômeno desta resistência e transferência de esforços. Essa análise foi realizada utilizando a metodologia *Push-off* com corpos de prova produzidos com quatro diferentes misturas de concreto, que possuíram como variantes o teor de fibras de aço e PVA, as armaduras transversais com e sem contato com a matriz cimentícia e alteração da dimensão máxima característica da brita utilizada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A elaboração de um referencial teórico faz-se necessária para embasar toda e qualquer pesquisa que se pretende realizar. Assim sendo, os itens a seguir buscam apresentar os principais conceitos acerca do trabalho a ser realizado.

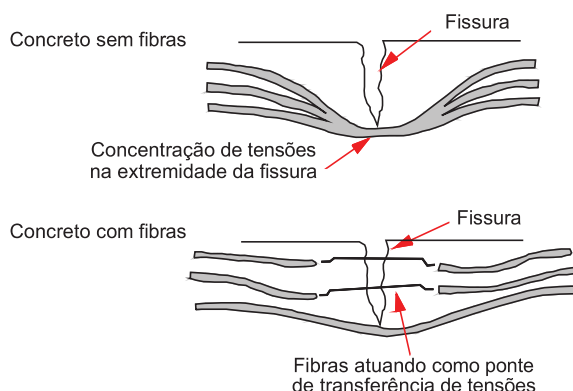
2.1 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

As fibras podem ser definidas como elementos descontínuos que possuem comprimento bem maior que a maior dimensão da seção transversal (FIGUEIREDO, 2011). A utilização das mesmas se dá, principalmente, com o objetivo de minimizar algumas limitações do concreto convencional, como fragilidade e baixa deformabilidade na tração. Além disso, é um reforço que não demanda de muitas etapas para ser implementado, pois consiste basicamente em adicionar as fibras no momento da mistura (CÁCERES et al., 2015).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a baixa capacidade de resistência à tração do concreto pode ser relacionada à sua incapacidade de interromper a propagação de fissuras. Portanto, quando uma nova fissura é formada, a área resistente ao carregamento diminui, ocasionando um aumento das tensões nas extremidades das mesmas.

A adição de fibras ao concreto tem um efeito benéfico em diversas propriedades, como na resistência à tração, resistência aos efeitos dinâmicos e resistência à flexão (MEDEIROS, 2012). Em concretos convencionais, as fissuras configuram uma espécie de obstáculo, impedindo a propagação de tensões de maneira adequada. Já em CRF, a presença de fibras contribui para a diminuição da concentração de tensões na extremidade da fissura, atuando como uma ponte de transferência de tensões, diminuindo a velocidade de propagação das mesmas (GRZYMSKI; MUSIAŁ; TRAPKO, 2019), como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – Mecanismo de transferência de tensões em peças fissuradas de concreto convencional e reforçado com fibras



Fonte: Medeiros (2012).

Além de diminuir a abertura das fissuras e contribuir na deformabilidade do concreto, a distribuição aleatória das fibras fornece um incremento de reforço atuante nas três direções, condição não alcançada por meio dos reforços convencionais com armaduras longitudinais e estribos (ARAÚJO et al., 2014).

Ademais, deve existir uma conformidade dimensional entre os agregados e as fibras, de modo que as últimas consigam entrecortar as fissuras que surgirem. Desta maneira, a recomendação existente é que para macrofibras de aço e polipropileno, a fibra utilizada deva possuir comprimento igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado utilizado. Esta recomendação existe para garantir que as fibras não atuem como reforço apenas da argamassa, mas sim da matriz do concreto como um todo (FIGUEIREDO, 2011).

2.1.1 Interação fibra-matriz

A inserção de fibras no concreto é realizada, atualmente, com objetivos distintos, sendo um deles a melhora do desempenho mecânico do material. Segundo Bentur e Mindess (2007), a eficácia desse método depende, principalmente, das interações fibra-matriz, sendo três delas especialmente significativas: adesão física e química, atrito e ancoragem mecânica oriunda da geometria ou deformações da fibra.

A maioria das fibras utilizadas atualmente na engenharia não possui ligação por adesão e atrito forte o suficiente para que as mesmas consigam desempenhar

completamente sua função e atuar como um mecanismo de reforço do concreto. Em vista disso, o mecanismo de ancoragem é o mais solicitado, fazendo com que a maioria das fibras disponíveis no mercado tenha uma forma complexa, geralmente com ganchos nas laterais, a fim de aumentar a ancoragem.

Entretanto, existe um conceito errôneo a respeito das características resistentes individuais da fibra pois, no momento de falha, a maioria das mesmas é arrancada, validando a hipótese de que o aspecto mais relevante não é sua resistência, mas sim, sua eficácia de aderência à matriz. Segundo Mukhopadhyay e Khatana (2014), o concreto reforçado com fibras é caracterizado por uma zona de transição de interface (ITZ, do inglês *Interface Transition Zone*) na vizinhança do reforço, similar a observada na ligação entre pasta de cimento e agregado. A microestrutura nesta zona é diferente, pois a natureza particulada do concreto fresco leva à formação de espaços preenchidos com água ao redor das fibras, devido ao empacotamento ineficiente dos grãos de cimento ao redor da superfície das mesmas, fazendo com que a matriz na vizinhança da fibra seja muito mais porosa do que o restante da matriz e, conseqüentemente, menos resistente.

2.1.2 Concreto reforçado com fibras de aço (CRFA)

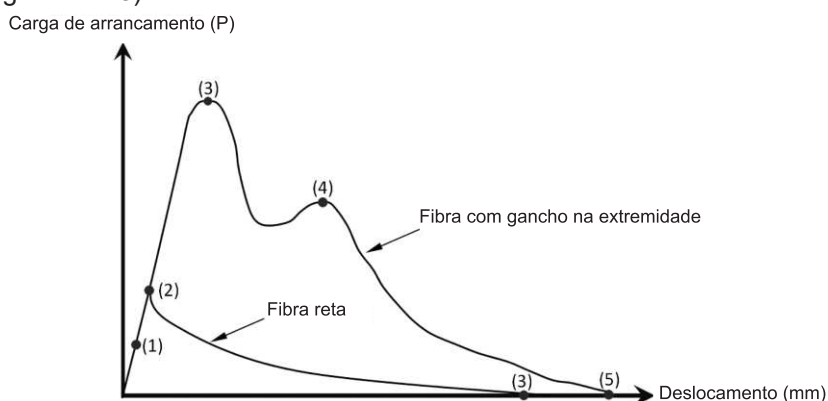
Em virtude da quantidade de materiais utilizados atualmente para a fabricação de fibras (kevlar, vidro, polietileno, entre outros), são consideradas capazes de reforçar matrizes cimentícias as fibras que apresentem maior deformação na ruptura e maior resistência à tração que a matriz de concreto (FIGUEIREDO, 2011).

Em vista disso e aliado ao melhor custo-benefício, o material mais utilizado atualmente são as fibras de aço pois, além de possuírem alto módulo de elasticidade, apresentam alta resistência mecânica. Pesquisas realizadas nos últimos anos demonstraram essa viabilidade através da realização de inúmeros ensaios, sendo alguns dos mesmos utilizados para a criação de ensaios específicos para CRFA.

Uma das grandes vantagens da utilização de aço na fabricação de fibras é a grande variedade de formas e tamanhos que as mesmas podem possuir. Os tipos mais comumente vistos são as fibras retas, corrugadas e com ganchos nas

extremidades. Em fibras retas, o arrancamento das mesmas é regido pelos mecanismos de descolamento seguido de arrancamento por fricção. Nas fibras com gancho, a contribuição da ancoragem aumenta, fazendo com que a carga de arranque aumente significativamente em relação às fibras retas (Estágio 2 até o Estágio 3 da Figura 2). Esse acréscimo de carga (Estágios 3 e 4 da Figura 2) ocorre pela deformação plástica que o gancho tem que sofrer para que a fibra seja completamente arrancada (ABDALLAH et al., 2018).

Figura 2 – Comportamento da carga de arrancamento em fibra reta (Estágios 1 ao 3) e fibra com gancho na extremidade (Estágios 1 ao 5)



Fonte: Adaptado de Abdallah et al. (2018).

Entretanto, apesar da existência de algumas recomendações para CRFA, pesquisas acerca do assunto ainda são necessárias para criar e validar procedimentos normativos. Ainda existem dificuldades de prever com precisão o acréscimo de resistência em elementos de CRFA submetidos à esforços cisalhantes, em virtude da sobreposição dos efeitos das fibras com os mecanismos que regem a resistência ao cisalhamento (VITOR; SANTOS; TRAUTWEIN, 2018).

2.1.3 Concreto reforçado com fibras de PVA (CRF-PVA)

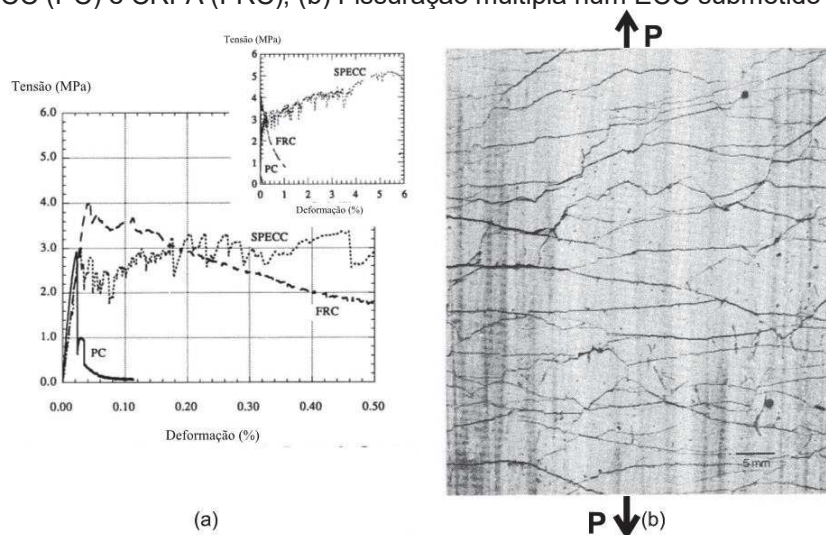
Fibras de PVA são materiais sintéticos de álcool polivinílico utilizados principalmente em aplicações industriais em virtude do seu bom desempenho. O PVA é utilizado em diversos estados, sendo empregado atualmente na indústria têxtil, de papel, de emulsões, petrolífera, entre outras. As fibras de PVA possuem alta resistência à tração, boa adesão ao meio alcalino e boa adesão ao cimento. Além

disso, como seu peso específico é baixo, ocorre uma redução no peso do concreto, efeito oposto ao observado em CRFA, além de não sofrerem degradação por corrosão (KURARAY, 2019).

De acordo com Arain et al. (2019), dentro da nova categoria de compósitos cimentícios de alto desempenho reforçados com fibras, denominada *Engineered Cementitious Composites* (ECC), as fibras de PVA apresentaram melhores resultados em comparação aos outros materiais testados. Sua adição em compósitos geralmente é realizada com teor de 2%, a fim de melhorar as propriedades de tenacidade e alta deformação pós-pico de carregamento (*strain-hardening*), em virtude do endurecimento por deformação. A utilização de teores mais elevados não interfere de maneira significativa na tenacidade do material, mas aumenta levemente sua resistência à compressão, em virtude da ligação da fibra com a matriz de cimento.

Segundo Li (1993), o motivo da alta capacidade de deformação dos ECC em comparação à CRFA e CC fica claro quando se examina o gráfico de tensão-deformação (Figura 3-(a)) e os danos na superfície da amostra (Figura 3-(b)). ECC com fibras de PVA possui estabilização das fissuras em 1% de deformação na tração. Após esse limite, as mesmas não apresentam aumento significativo até o momento de ruptura do concreto, que ocorre com a deformação à tração na ordem de 5%. Nesse intervalo, a deformação ocorre pela formação de novas microfissuras, enquanto a abertura das existentes permanece praticamente constante. Tal efeito é chamado de “auto-cicatrização” das fissuras (GARCEZ, 2009).

Figura 3 – (a) Curva Tensão x Deformação de um ECC (SPECC) submetido a tração uniaxial em comparação a CC (PC) e CRFA (FRC); (b) Fissuração múltipla num ECC submetido à tração uniaxial



Fonte: Adaptado de Li (1993).

A maioria das pesquisas relacionadas a utilização de fibras de PVA em concreto, como as de Arain et al. (2019), realizaram análises de adesão fibra-matriz, tenacidade ou resistência e deformação na flexão, fazendo com que a área de cisalhamento ainda necessite de maiores estudos.

2.2 TENSÕES CISALHANTES EM ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO

O concreto, quando solicitado por tensões cisalhantes, é considerado um material frágil, pois rompe subitamente, sem apresentar um patamar de escoamento, como alguns tipos de aço. Atualmente, para representar o comportamento de peças de concreto submetidas a tensões de cisalhamento são empregadas as teorias de Mohr-Coulomb e Atrito-cisalhamento.

2.2.1 Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb

Em 1773, Coulomb (Caputo, 1988) apresentou a Equação (1) para relacionar a tensão de cisalhamento à tensão normal em materiais granulares, baseado na premissa de que a tensão de cisalhamento (τ) é diretamente proporcional a tensão normal atuante (σ).

$$\tau = c + \sigma \times tg\phi \quad (1)$$

Onde:

τ – Tensão de cisalhamento;

c – Coesão;

σ – Tensão normal ao plano de cisalhamento;

ϕ – Ângulo de atrito interno.

Posteriormente, no ano de 1900, Mohr generalizou a expressão acima, de forma que a mesma pudesse ser aplicada para todos os tipos de materiais, representando a envoltória de ruptura de todos os círculos de Mohr traçados para diferentes tensões principais (CAPUTO, 1988).

A partir da envoltória representada pelo círculo de Mohr, considerando o ângulo de atrito do concreto de aproximadamente 37° e realizando algumas relações trigonométricas, a coesão do concreto pode ser estimada a partir das resistências à tração ou compressão, respectivamente:

$$f_t \approx c \quad (2)$$

$$f_c \approx 4 \times c \quad (3)$$

As expressões obtidas são válidas apenas para peças de concreto simples, sem a presença de armaduras. Para um plano de ruptura de concreto rugoso aderente com armadura normal à interface, a expressão que representa sua resistência última ao cisalhamento é:

$$\tau_u = f_t + 0,75 \times (\rho_w f_y + \sigma_n) \quad (4)$$

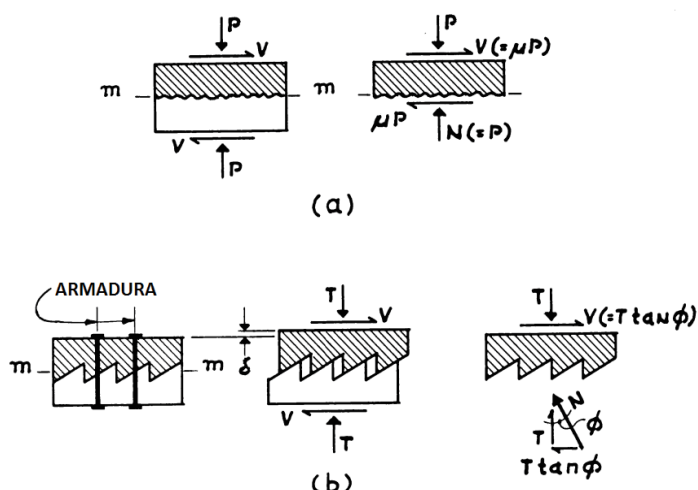
Onde a parcela $(\rho_w f_y + \sigma_n)$ corresponde à tensão normal devida à armadura transversal à interface e à ação das forças aplicadas externamente.

2.2.2 Teoria atrito cisalhamento

A fim de analisar e entender o efeito do esforço cortante na ligação entre peças de concreto pré-moldadas, Birkeland e Birkeland (1966) apresentaram um estudo que é conhecido atualmente como “Teoria Atrito-cisalhamento”, que consistiu na proposta de uma equação linear (Equação (5)) que representasse a tensão última resistente entre as faces de uma interface de ruptura.

A teoria proposta por Birkeland e Birkeland (1966), representada na Figura 4-(a), foi baseada em um bloco monolítico de concreto, no qual se admite a existência de um plano fissurado m-m. O esforço cortante horizontal (V) possui tendência a ocasionar um deslizamento entre as faces, movimento impedido pela força de atrito μP , onde μ é o coeficiente de atrito e P é a força normal atuante.

Figura 4 – Teoria atrito-cisalhamento



Fonte: Adaptado de Birkeland e Birkeland (1966).

Em virtude do deslizamento, e sendo o plano m-m rugoso com uma inclinação ϕ , existirá a separação das duas partes, como indica a Figura 4-(b). A colocação da armadura poderá evitar tal movimento, devido ao surgimento de esforços de tração (T) na armadura, que agem comprimindo o concreto.

Analisando a Figura 4-(a) e Figura 4-(b), tem-se que $T \tan \phi$ é equivalente a μP , pelo equilíbrio de forças. Diante disso, Birkeland e Birkeland (1966) propuseram uma expressão para avaliar a resistência ao cisalhamento na interface.

$$V_u = T_u \times \tan \phi = A_{sw} \times f_y \times \tan \phi \quad (5)$$

$$\tau_u = \rho_w \times f_y \times \tan \phi \leq 5,5 \text{ MPa} \quad (6)$$

Onde:

V_u – Força cortante horizontal última;

T_u – Força de tração última na armadura;

$\tan \phi = \mu$ – Coeficiente de atrito;

A_{sw} – Área da armadura transversal;

f_y – Tensão de escoamento da armadura transversal ($f_y \leq 414 \text{ MPa}$);

τ_u – Tensão de cisalhamento última;

ρ_w – Taxa de armadura geométrica ($\rho_w \leq 0,015$).

Sendo:

$\mu = 1,7$ para concreto monolítico;

$\mu = 1,4$ para superfícies artificialmente rugosas;

$\mu = 0,8$ a $1,0$ para superfícies lisas e conexões concreto aço.

2.3 TRANSFERÊNCIA DAS TENSÕES DE CISALHAMENTO EM INTERFACES DE CONCRETO

Com o passar dos anos e a realização de diversos estudos, verificou-se que as tensões de cisalhamento podem ser avaliadas não somente em pré-moldados, foco dos estudos iniciais, mas também em reparos, no suplemento de concreto pré-moldado com a aplicação de concreto moldado *in-loco*, no aumento de resistência de um elemento através de novas seções e em interfaces de concreto com idades diferentes (BIRKELAND; BIRKELAND, 1966; RANDL, 2013).

Quando peças de concreto são submetidas aos esforços de cisalhamento, ocorre uma propensão de deslizamento na face cisalhada, resultando em uma espécie de movimento de translação entre as duas superfícies distintas de concreto. Essa transferência de esforços é sintetizada em dois mecanismos: transferência pela superfície de contato e transferência pela armadura transversal à interface (ARAÚJO, 1997).

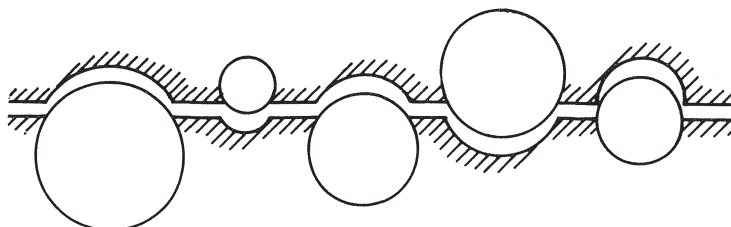
Essa segmentação é realizada apenas para fins de análise pois, em virtude da complexidade do fenômeno de resistência ao cisalhamento, um mecanismo interfere no outro. Embora ainda não exista um consenso sobre o quanto um parâmetro é influente no fenômeno geral ou quanto um mecanismo se sobrepõe a outro, sabe-se que a resistência ao cisalhamento é uma combinação de fatores, como coesão, engrenamento dos agregados, atrito e efeito de pino.

2.3.1 Coesão e Engrenamento dos Agregados

De acordo com Randl (2013), o mecanismo de coesão é causado pelas forças adesivas advindas de ligações físicas e químicas do material e, justamente por depender dessa força adesiva, o deslizamento na interface deve ser muito pequeno (não maior que 0,05 mm) para que esse efeito não se quebre e o mecanismo deixe de contribuir na resistência da peça ao cisalhamento.

Ao longo de uma fissura, o concreto pode ser representado como um sistema de duas fases: a matriz cimentícia e as partículas de agregado. Em concretos convencionais, com f_{ck} inferior a 50 MPa, a resistência e a rigidez das partículas de agregado são maiores que as da matriz cimentícia. Entretanto, a zona de transição, é a componente mais fraca do sistema. Dessa maneira, a fissuração geralmente ocorre na matriz, contornando as partículas de agregados, tal como ilustra a Figura 5 (WALRAVEN; REINHARDT, 1981).

Figura 5 – Estrutura geralmente observada em um plano fissurado de concreto convencional



Fonte: Walraven e Reinhardt (1981).

Walraven e Reinhardt (1981) realizaram um extenso programa experimental, com finalidade de validar a teoria e modelagem matemática proposta a respeito da influência do engrenamento dos agregados na fissuração e na transferência de esforços de cisalhamento em peças de concreto. Assim como o previsto, o aumento da DMC do agregado leva a um aumento da tensão suportada. Em contrapartida, o aumento da largura das fissuras diminui consideravelmente a capacidade do concreto de transmitir esforços, principalmente de cisalhamento. Ademais, quanto maior a largura da fissura, menor a contribuição do mecanismo de engrenamento na transferência de tensões.

Os estudos mais recentes sobre o fenômeno de engrenamento dos agregados o consideram como um dos fatores mais influentes na transmissão de tensões de cisalhamento em peças sem reforço transversal, validando os modelos propostos por Walraven e Reinhard (1981). Assumindo que a propagação das fissuras ocorra preferencialmente na zona de transição, os principais fatores que interferem nessa transmissão de tensões são o tipo de agregado, sua DMC e a proporção entre o volume de agregado com o volume de concreto (HUBER; HUBER; KOLLEGGER, 2019).

Os estudos de Huber, Huber e Kolleger (2019) consistiram em ensaios com 18 corpos de prova do tipo *Push-off* e 10 vigas com reforço de aço submetidas à esforços cisalhantes utilizando como agregado gráudo dolomita e cascalho quartzítico. Os ensaios experimentais foram utilizados para obter o fator de efetividade C_f de cada agregado, parâmetro de entrada da formulação de Walraven e Stroband (1994, apud Huber, Huber e Kolleger, 2019) representada na Equação (7).

$$\tau_{ag} = C_f \{-0.04f_c + [1.8w^{-0.8} + (0.292w^{-0.7} - 0.25)f_c]s\} \quad (7)$$

Onde:

τ_{ag} – Tensão de cisalhamento suportada pelo engrenamento dos agregados;

f_c – Resistência a compressão do concreto;

w – Abertura da fissura;

s – Deslocamento paralelo à interface cisalhada;

C_f – Fator de efetividade do agregado.

Com a obtenção do fator de efetividade foi possível ensaiar vigas com reforços transversais e quantificar quanto da parcela de resistência é função do engrenamento dos agregados. Tal consideração pôde ser realizada em virtude da inexistência de forças de compressão normais à interface cisalhada no ensaio *push-off*, fazendo com que não exista transferência de tensões de cisalhamento por atrito, além das geradas pela própria armadura. Além disso, é difícil dissociar a coesão do engrenamento, fazendo com que a maioria dos estudos realizados analise os dois mecanismos como um só.

A partir da medição da rugosidade da interface cisalhada, através de um microscópio confocal a laser, Huber, Huber e Kolleger (2019) validaram a hipótese de que o engrenamento dos agregados é diretamente proporcional à rugosidade da superfície e da cinemática da fissura, além de comprovar que a formulação empírica de Walraven e Stroband representa bem o fenômeno.

Foi observado, através da correlação de imagens digitais, que as vigas que apresentaram rachaduras de cisalhamento mais pronunciadas perto do ponto de aplicação da carga possuem maior resistência ao cisalhamento acompanhada de maiores contribuições do mecanismo de engrenamento em relação as vigas que apresentaram rachaduras mais pronunciadas no centro da interface cisalhada.

Rahal e Alrefaei (2018) realizaram estudos em vigas de concreto com reforço transversal e agregados reciclados provindos de resíduos de demolição a fim de quantificar o engrenamento nessa situação. A utilização de agregados reciclados modificou a cinemática da fissura, que não apresentou configuração como a da Figura 5, pois os agregados reciclados não possuem propriedades constantes em todo seu volume, podendo até possuir zonas de transição de interfaces interiores, originadas na primeira mistura realizada com o material. Em virtude dessa diferença e desses pontos frágeis do agregado, a cinemática da fissura muda, alterando o comportamento do mecanismo de engrenamento.

Foram utilizadas vigas com estribos, fazendo com que a partir de certo deslocamento, o efeito de pino e o atrito tenham se sobreposto sobre os demais, atuando como principais mecanismos de transferência de esforços de cisalhamento. Entretanto, apesar de não terem sido moldados corpos de prova sem reforços, a fim de quantificar apenas as parcelas de coesão e engrenamento dos agregados, notou-se uma diminuição na resistência ao cisalhamento em comparação à concretos convencionais, fazendo com que se chegasse a conclusão de que a substituição de agregados naturais por reciclados não possa ser superior a 20% sem alterar significativamente o mecanismo de engrenamento dos agregados (RAHAL; ALREFAEI, 2018).

Existem diversas linhas de pesquisa sobre o comportamento do engrenamento dos agregados e sua contribuição na resistência, visto que sua quantificação é de difícil análise, em virtude da natureza irregular das faces do material, falha das

amostras e estado de tensões não uniforme em torno da rachadura. Em vista disso, os resultados dos testes estão sujeitos a uma considerável quantidade de dispersão. Quantidade esta que, segundo Kaufmann et al. (2019), é ainda maior em CRF, em virtude da grande variabilidade na distribuição e orientação das fibras.

2.3.2 Efeito de Pino

Segundo Walraven e Reinhardt (1981), o efeito de pino pode ser definido como a capacidade que as barras de reforço possuem de transferir forças perpendiculares ao seu eixo. Essa transferência de forças ocorre a partir do momento em que o deslizamento na interface se inicia, gerando um deslocamento lateral das extremidades superior e inferior do conector, produzindo tensões de flexão na barra e forças de tração axiais devido à abertura da fissura (RANDL, 2013).

A maioria das pesquisas atuais sobre o efeito de pino leva em consideração o mecanismo de cisalhamento que ocorre em uma viga biapoiada convencional, que é diferente do cisalhamento puro. Alguns autores, como Loov e Patnaik (1992), concluíram que os resultados obtidos em ensaios de cisalhamento direto representam o comportamento das vigas, desde que a superfície da interface seja rugosa e que exista uma parcela de resistência por aderência. Entretanto, o efeito de pino entre as duas situações não pode ser comparado, pois a presença de esforços de flexão modifica o estado de tensões e a configuração da interface cisalhada da peça de concreto (ARAÚJO, 1997).

Fiset, Bastien e Mitchell (2019) realizaram ensaios com vigas biapoiadas e com a presença de armaduras longitudinais e transversais com e sem contato com a matriz. As armaduras transversais com contato foram compostas por estribos convencionais, e as sem contato foram feitas perfurando a viga verticalmente e inserindo uma barra em cada furo.

O mecanismo de efeito de pino apresentou contribuição muito pequena, podendo até ser desconsiderada. O que mais contribuiu foram os estribos, representando cerca de 51% da resistência ao cisalhamento. Nas vigas com estribos sem aderência com a matriz cimentícia, verificou-se uma queda abrupta na resistência

ao cisalhamento, semelhante ao que acontece em peças sem reforço, pois os mecanismos de engrenamento dos agregados e coesão não possuem mais grande efetividade.

É importante ressaltar que, em vigas, antes do surgimento das fissuras inclinadas, a deformação nos estribos é a mesma do concreto adjacente aos mesmos. Como a tensão de tração é praticamente suportada pela armadura positiva, a tensão transferida para os estribos é pequena fazendo com que apenas após o início da fissuração inclinada os estribos passem a transferir força cortante. Entretanto, em virtude da cinemática da fissura em vigas, o estribo não pode ser classificado como armadura longitudinal ao plano cisalhado, não sendo submetido aos mesmos esforços da armadura longitudinal positiva.

2.3.3 Atrito

O componente de atrito desenvolve-se diretamente proporcional à força de compressão atuando perpendicularmente a interface e é dependente do grau de rugosidade da mesma. Se a superfície for suficientemente rugosa, armaduras que atravessam a interface levam a um aumento da força de atrito, em virtude do alargamento da articulação, conforme proposto pela Teoria atrito-cisalhamento (BIRKELAND; BIRKELAND, 1966; RANDL, 2013).

O mecanismo de atrito está diretamente ligado com a rugosidade da superfície e com o efeito de pino, pois as forças de tração que ocorrem na barra devido à abertura de fissuras produzem como reação esforços de compressão normais à interface, gerando o atrito. Dessa maneira, caso não exista aderência suficiente entre o concreto e a armadura, a capacidade resistente do concreto diminui.

Soetens e Matthys (2017) desenvolveram um programa de testes com 69 corpos de prova de cisalhamento do modelo da JSCE (representado na Figura 7-(b)), contemplando concretos convencionais e auto adensáveis, ambos com a adição de fibras de aço de diferentes tamanhos, submetidos a esforços de cisalhamento e pressões de confinamento normais à superfície. Ao avaliar os deslocamentos e a

fissuração, concluíram que o estado de cisalhamento puro não foi atingido, pois o esforço de flexão também ocorreu.

Apesar de não ter atingido o estado de cisalhamento puro, os resultados obtidos por Soetens e Matthys (2017) são válidos na análise do aumento da resistência causado pela adição de fibras e aplicação de pressão de confinamento. Para peças de concreto convencional, o aumento de resistência é menor do que o esperado de um modelo linear proporcional à dosagem de fibras. Já em peças de concreto auto adensável, esse acréscimo na resistência é maior que o esperado de um modelo linear. Ademais, em virtude da utilização de mais de um tipo de fibra, foi provado experimentalmente que fibras maiores possuem resultados com menor variação e maior resistência.

Outrossim, os corpos de prova ensaiados com exposição à pressão confinante apresentaram resistências ao cisalhamento superiores aos demais, sendo a pressão confinante diretamente proporcional à resistência ao cisalhamento. Por estarem submetidos a um estado de tensão biaxial, alguns corpos de prova apresentaram falha de compressão após atingir o pico de tensão de cisalhamento. Tal fenômeno valida a teoria de Mohr-Coulomb que afirma que quanto maior a parcela de tensão normal, maior a resistência ao cisalhamento.

2.3.4 Interação

Apesar de existirem diferentes análises dos mecanismos de resistência ao cisalhamento, em uma estrutura real submetida a uma carga de cisalhamento, os mecanismos interagem, se sobrepondo em algumas situações, afetando-se mutuamente em função do deslizamento da interface. Após o rompimento da ligação adesiva, o deslizamento aumenta progressivamente, “esmagando” os agregados e diminuindo o efeito de engrenamento. Paralelamente, o efeito do atrito vai decaindo ou se estabilizando, até que se atinja um ponto em que praticamente apenas o efeito de pino esteja agindo como mecanismo de transferência de esforços. A real contribuição de cada um dos parâmetros é função da rugosidade da superfície, tipo e

DMC do agregado e quantidade de reforço utilizado, podendo ser armadura convencional ou outras variações, como as fibras (RANDL, 2013).

Portanto, de maneira simplificada, a resistência ao cisalhamento (τ) de uma peça de concreto pode ser expressa pela Equação (8).

$$\tau = \tau_{ad} + \tau_{at} + \tau_{ag} + \tau_w \quad (8)$$

Onde:

τ_{ad} – Contribuição da aderência;

τ_{at} – Contribuição do atrito;

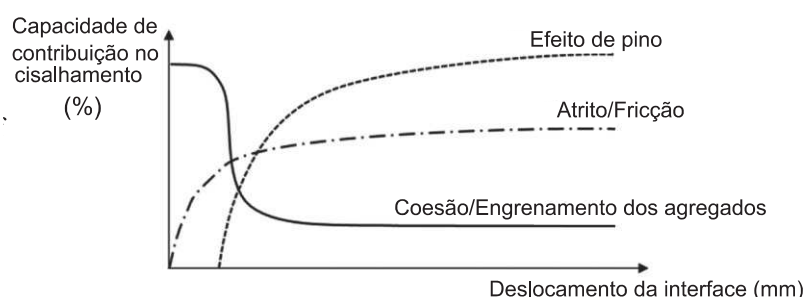
τ_{ag} – Contribuição do engrenamento dos agregados;

τ_w – Contribuição do efeito de pino.

Além dos mecanismos convencionais, se existirem outras adições ao concreto, como fibras, a contribuição das mesmas deve ser acrescentada na Equação (8).

Sabe-se que as contribuições relativas desses parâmetros variam com base na magnitude da força de cisalhamento aplicada e no grau de deslocamento que ocorre entre as interfaces, como ilustra a Figura 6. A grande questão acerca do fenômeno de cisalhamento é a compreensão de como um mecanismo interfere no outro e, caso essa sobreposição de fatores seja prejudicial a resistência, como contorná-la.

Figura 6 – Capacidade de transferir tensões de cisalhamento em função do deslocamento para cada mecanismo



Fonte: Adaptado de Soltani e Ross (2017).

Lin e Guo (2019) realizaram um estudo com 19 corpos de prova *push-off* mantendo como constante o traço de concreto utilizado e alterando a quantidade de armadura longitudinal. Além disto, foram utilizadas placas laterais parafusadas no corpo de prova a fim de adicionar um mecanismo resistente. Os corpos de prova foram

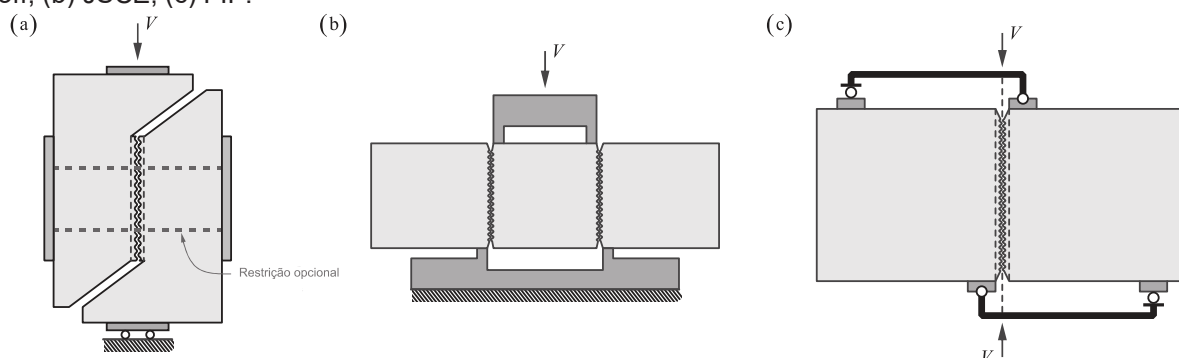
moldados com o objetivo de discretizar os mecanismos de transferência de tensões de cisalhamento.

Os métodos de execução dos ensaios e as análises realizadas tornaram possível a separação de alguns mecanismos. Para o concreto analisado, com resistência à compressão de 36,9 MPa, chegou-se à conclusão que o engrenamento dos agregados representava cerca de 33%, a coesão 3%, o atrito 30% e a ação de pino 34% da resistência ao cisalhamento. Os valores de cada uma das parcelas nas situações em que existiam chapas laterais sofrem grandes modificações, em virtude da interação entre os mecanismos e o aumento dos deslocamentos.

2.4 METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE ESFORÇOS DE CISALHAMENTO

Nos últimos anos foram realizadas inúmeras investigações a respeito da transferência de esforços de cisalhamento em interfaces de concreto convencionais e reforçadas com fibras. Os três testes mais realizados foram o *Push-off* (Figura 7-(a)), o da Sociedade Japonesa de Engenheiros Civis JSCE (Figura 7-(b)) e o ensaio da FIP – Federação Internacional de Protensão (Figura 7-(c)) (KHANLOU et al., 2013).

Figura 7 – Métodos de teste para a avaliação da resistência ao cisalhamento do concreto; (a) Push-off; (b) JSCE; (c) FIP.



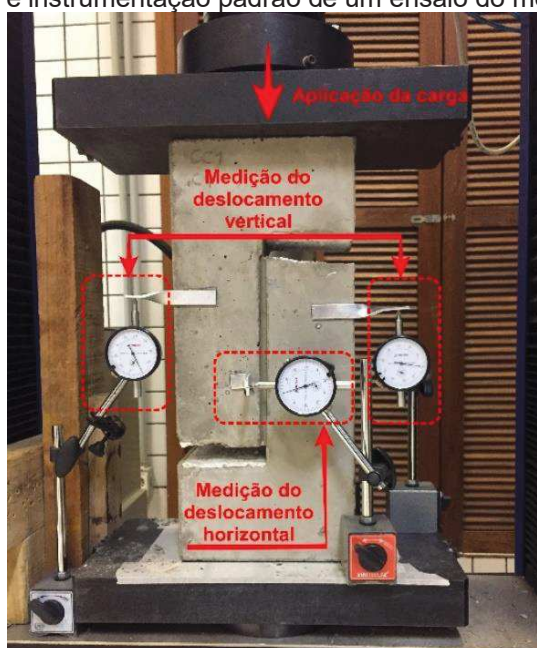
Fonte: Adaptado de Kaufmann et al. (2019).

Em todas os modelos apresentados as amostras podem ser pré-fissuradas ou possuir algum tipo de entalhe, de maneira a condicionar a ocorrência da interface de ruptura em um lugar pré-determinado. O ensaio *Push-off* é muito utilizado para o concreto, entretanto é relativamente complicado e não possui padronização nos seus

corpos de prova. Dessa maneira, a maioria dos estudos relevantes realizados com esta metodologia – como Hofbeck, Ibrahim e Mattock (1969), Walraven e Reinhardt (1981) e Khaloo e Kim (1997) – não possuem padrão ou algum tipo de relação entre as dimensões dos corpos de prova utilizados (KHANLOU et al., 2013; KAUFMANN et al., 2019).

Apesar de não possuir padronização nas dimensões dos corpos de prova, a metodologia de ensaio do modelo *Push-off* segue sempre o mesmo procedimento. Os corpos de prova possuem armadura de montagem, a fim de minimizar ao máximo os esforços de flexão, e são submetidos a aplicação de uma carga vertical. A maioria dos pesquisadores opta por diminuir a seção transversal central da peça, garantindo a posição da interface cisalhada, conforme representado na Figura 8.

Figura 8 – Esquemática e instrumentação padrão de um ensaio do modelo *Push-off*



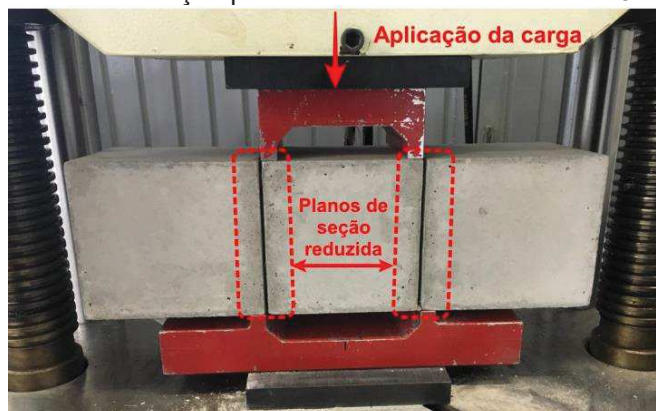
Fonte: Autor (2019).

O ensaio de resistência ao cisalhamento da Sociedade Japonesa de Engenheiros Civis JSCE-SF6 (JSCE, 1990) é relativamente mais simples de ser executado, entretanto deve ser realizado de maneira que os efeitos de flexão e arqueamento sejam reduzidos ao máximo, forçando a peça a um estado de cisalhamento puro. Além disto, esse tipo de ensaio foi elaborado para ser utilizado em CRFA (SOETENS; MATTHYS, 2017).

Nesta metodologia de ensaio é necessário o uso de um suporte de aço inferior e superior de dimensões padrão. Os corpos de prova são moldados possuindo dois

planos de área reduzida, com o objetivo de induzir que o cisalhamento ocorra nesses planos. A esquematização do ensaio da JSCE-SF6 pode ser vista na Figura 9.

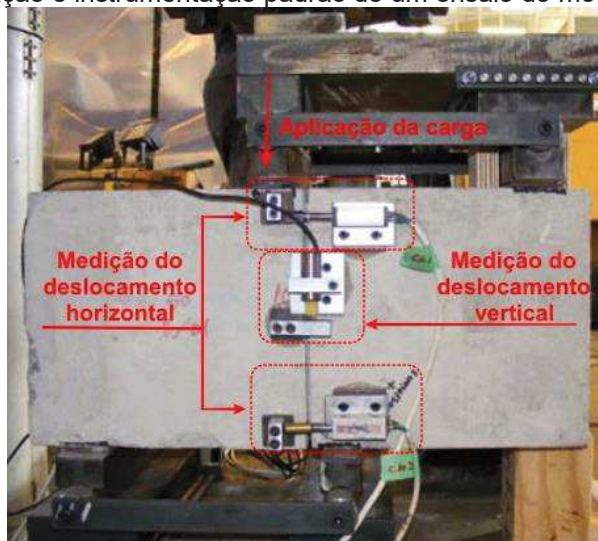
Figura 9 – Esquematização e instrumentação padrão de um ensaio do modelo JSCE SF6



Fonte: Adaptado de Pufal (2017).

Segundo Khanlou et al. (2013), a utilização do método da FIP é a mais indicada quando comparada ao método de *Push-off* e da Norma Japonesa, pois a existência de apenas uma interface de cisalhamento em conjunto com a aparelhagem utilizada, minimiza as chances da ocorrência de um momento de flexão devido a excentricidade da força. A esquematização padrão do ensaio pode ser vista na Figura 10.

Figura 10 – Esquematização e instrumentação padrão de um ensaio do modelo da FIP



Fonte: Adaptado de Khanlou et al. (2013).

Assim, com base no que foi exposto e nos equipamentos disponíveis, este trabalho apresenta os resultados de um programa experimental realizado com a metodologia *Push-off* buscando o estado de cisalhamento puro.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de avaliar a influência dos mecanismos de efeito de pino, coesão, aderência e engrenamento dos agregados na resistência ao cisalhamento de peças de concreto, este trabalho consistiu em um estudo experimental realizado com base em quatro dosagens de concreto produzidas. As etapas de dobragem das armaduras, montagem das formas e produção dos concretos foram realizadas no Laboratório de Estruturas, e a etapa de ruptura das peças foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil, ambos localizados na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Toledo.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Este trabalho consistiu na produção e análise das propriedades resistentes de quatro dosagens de concreto a partir de uma dosagem utilizada por uma concreteira na região, já existindo estudos e ensaios prévios acerca da mesma. Os demais traços foram adaptados a partir do existente, com base nas especificidades dos materiais disponíveis e nos objetivos da pesquisa. As características de todos os materiais empregados estão descritas a seguir.

3.1.1 Aglomerante

Como aglomerante foi utilizado Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CPV-ARI da marca Supremo. Este possui elevado teor de clínquer e alto teor de finura, resultando em um concreto mais trabalhável, com resistência inicial superior aos demais e tempo de pega mais rápido, possibilitando a desforma dos corpos de prova 24 horas após a concretagem.

3.1.2 Agregados

Os agregados utilizados foram areia natural de rio, extraída do Rio Paraná, como agregado miúdo, e rocha basáltica britada como agregado graúdo. Os mesmos foram submetidos a ensaios de caracterização a fim de determinar sua distribuição granulométrica, massa específica, e teor de material pulverulento, seguindo as prescrições da NBR NM 248 (ABNT, 2001), NBR NM 46 (ABNT, 2003), NBR NM 45 (ABNT, 2006), NBR NM 52 (ABNT, 2009), NBR NM 53 (ABNT, 2009) e NBR 7211 (ABNT, 2009).

3.1.3 Fibras

Para a produção de concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) foi utilizada a fibra de aço de extremidades duplas modelo FF1 da Wirand®, apresentada na Figura 11, produzida a partir de aço de baixo teor de carbono, trefilado a frio, cujas propriedades constam na Tabela 1.

Figura 11 - Fibra de aço da Wirand modelo FF1 da Wirand®



Fonte: Autor (2019).

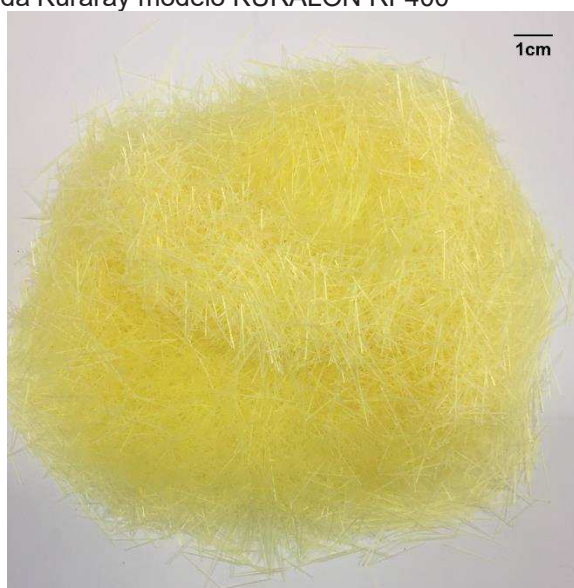
Tabela 1 – Propriedades físicas e Mecânicas da fibra Wirand® FF1

Comprimento	Diâmetro	Resistência à tração do aço	Deformação na ruptura	Módulo de Elasticidade	Nº de fibras por quilo
50 mm	1 mm	>1100 MPa	<4%	210 GPa	3244

Fonte: Wirand® (2019).

Para a produção de concreto reforçado com fibras de PVA (CRF-PVA) foi utilizada uma das fibras da Kuraray, modelo KURALON™ RF400, ilustrada na Figura 12, cujas propriedades podem ser vistas na Tabela 2.

Figura 12 – Fibra de PVA da Kuraray modelo KURALON RF400



Fonte: Autor (2019).

Tabela 2 – Propriedades físicas e Mecânicas da fibra KURALON™ RF400

Comprimento	Diâmetro	Resistência à tração	Deformação na ruptura	Módulo de Elasticidade
12 mm	200 µm	975 MPa	9%	27 GPa

Fonte: Kuraray (2019).

3.1.4 Aditivo

Todos os traços produzidos necessitaram da utilização de um aditivo a fim de aumentar a trabalhabilidade dos mesmos. O material utilizado foi o aditivo superplastificante ADIMENT da marca Vedacit, composto basicamente por resina melaminaformaldeído, possuindo um aspecto incolor, isento de cloretos e densidade de 1,12 g/cm³ (VEDACIT, 2019).

3.2 TRAÇOS UTILIZADOS

O traço de concreto utilizado como base para essa pesquisa é atualmente produzido por uma empresa concreteira da cidade de Toledo, com agregado graúdo de dimensão máxima característica de 19 mm, denominado CC1, e resistência à compressão axial característica próxima a 40 MPa.

Os demais traços foram adaptados a partir da alteração do tipo de brita utilizada e da inclusão de fibras a fim de alterar as propriedades resistentes do concreto. Na primeira mistura (CC0) não foram adicionadas fibras, enquanto nas misturas CRFA e CRF-PVA foram adicionados 0,5% de fibras de aço e 0,5% de fibras de PVA, respectivamente. As quantidades de materiais para a produção de 1 m³ de cada um dos traços pode ser vista na Tabela 3.

Tabela 3 – Quantidade de materiais necessários para a produção de 1 m³ de concreto

	Cimento (kg/m³)	Brita 0 - DMC = 9,5 mm (kg/m³)	Brita 1 - DMC = 19,0 mm (kg/m³)	Areia (kg/m³)	Água (kg/m³)	Fibras (kg/m³)	Aditivo (kg/m³)
CC1	430	0	1050	795	180	0	2,58
CC0	430	1050	0	795	180	0	2,58
CRFA	430	1050	0	795	180	40	2,58
CRF-PVA	430	1050	0	795	180	2,50	2,58

CC – Concreto convencional, CRFA – Concreto reforçado com fibras de aço, CRF-PVA – Concreto reforçado com fibras de PVA

Fonte: Autor (2019).

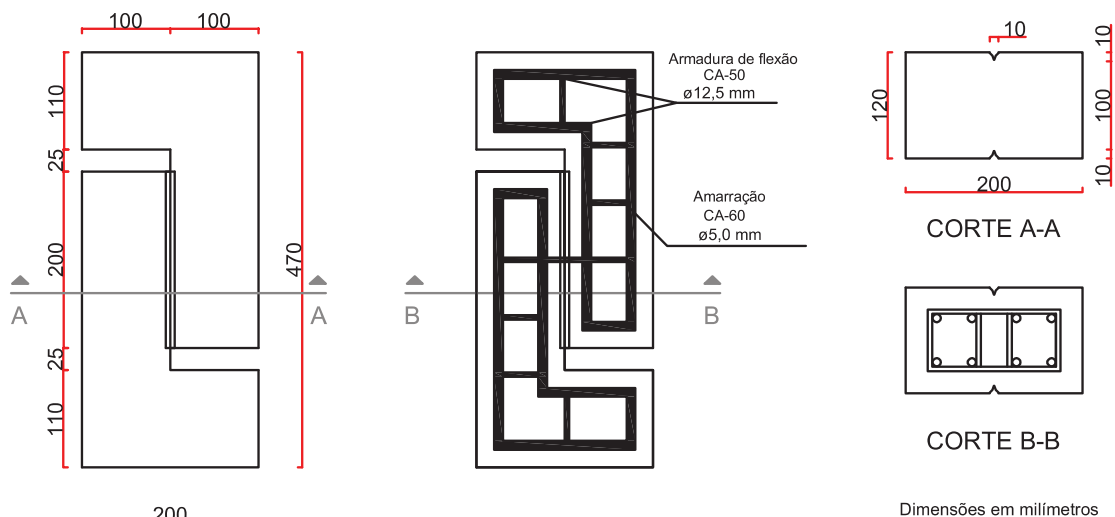
Em todas as misturas o teor de argamassa e a relação água/cimento foram mantidos constantes, iguais a 53,8% e 0,42, respectivamente. A quantidade de aditivo presente no traço original corresponde a 0,6% da massa de cimento, sendo apenas replicada para os demais traços.

3.3 ESPECIFICAÇÕES DOS CORPOS DE PROVA

Para a realização do ensaio de cisalhamento direto foi utilizada a metodologia *Push-off*, com corpos de prova de dimensões semelhantes às utilizadas por Savaris (2016), conforme Figura 13. Todas as formas foram fabricadas em MDF e, a fim de assegurar que a ruptura ocorresse no plano indicado, a seção foi reduzida através da colocação de dois filetes de madeira nas paredes do molde, garantindo uma área de

cisalhamento de aproximadamente 20.000 mm². Cada corpo de prova prismático continha aproximadamente 11,20 litros de concreto.

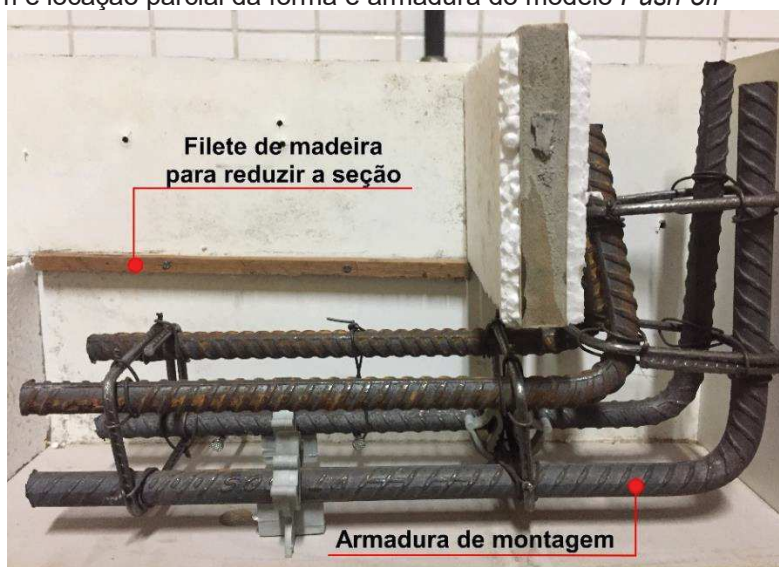
Figura 13 – Dimensão do corpo de prova utilizado no ensaio *Push-off*



Fonte: Adaptado de Savaris (2016).

Todos os corpos de prova utilizados no ensaio de cisalhamento direto tiveram armadura de montagem composta por barras de CA-50 com 12,5 mm de diâmetro, conforme Figura 14. Para quantificar os diferentes mecanismos de resistência ao cisalhamento foram moldados corpos de prova com três configurações de armadura transversal.

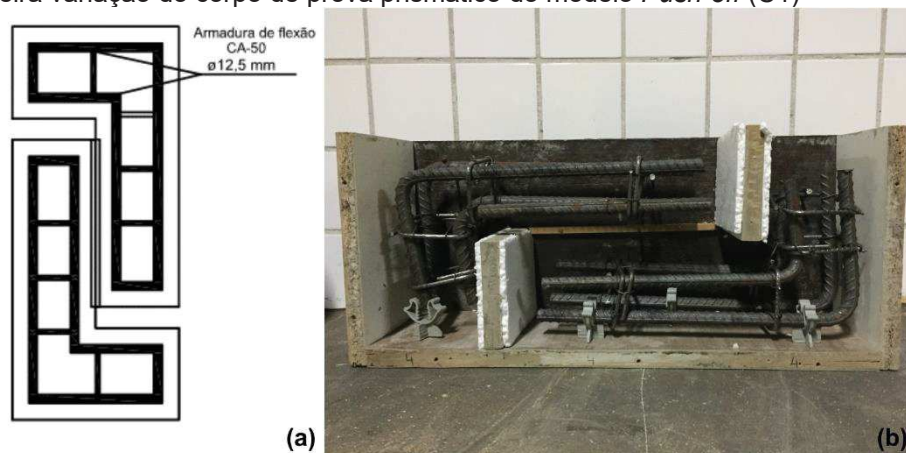
Figura 14 – Montagem e locação parcial da forma e armadura do modelo *Push-off*



Fonte: Autor (2019).

Um corpo de prova foi montado sem armadura transversal, conforme Figura 15, fazendo com que a resistência ao cisalhamento seja função dos mecanismos de aderência entre as partículas do concreto e engrenamento dos agregados.

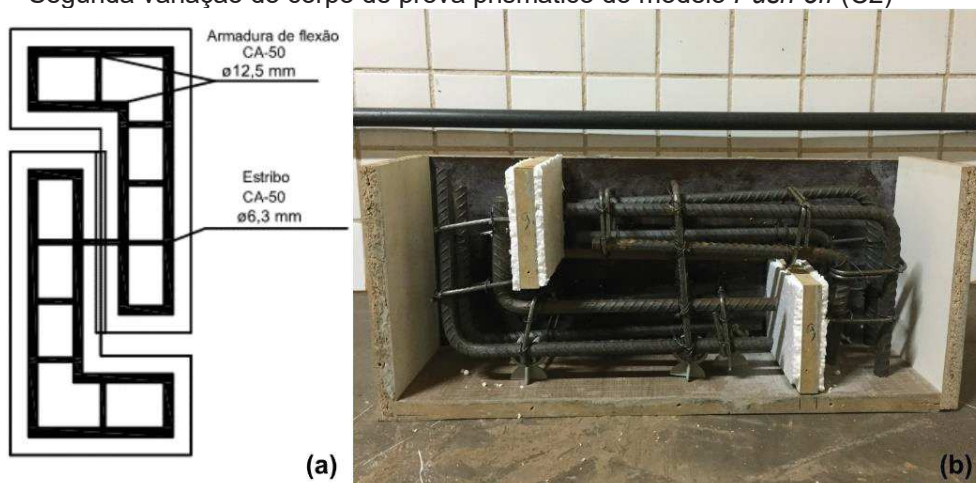
Figura 15 – Primeira variação do corpo de prova prismático do modelo *Push-off* (C1)



Fonte: Autor (2019).

Um corpo de prova foi montado com armadura transversal convencional, conforme Figura 16, composta por dois ramos de estribo de aço CA-50 de 6,3 mm de diâmetro, totalizando taxa de armadura de 0,3117%, fazendo com que os mecanismos de atrito e efeito de pino atuem em conjunto com a aderência e o engrenamento dos agregados.

Figura 16 – Segunda variação do corpo de prova prismático do modelo *Push-off* (C2)

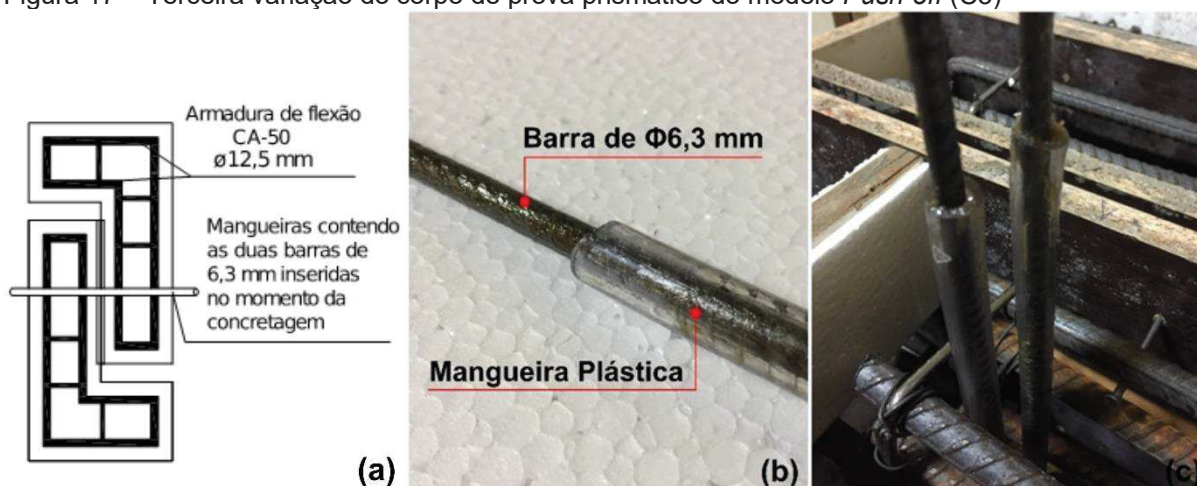


Fonte: Autor (2019).

O último corpo de prova foi montado com duas barras de aço CA-50 de 6,3 mm de diâmetro envoltas por mangueiras plásticas, conforme Figura 17, garantindo a mesma taxa de armadura dos corpos de prova com armadura transversal convencional. Tal metodologia foi utilizada a fim de discriminar o efeito de pino

efetivamente causado pelas tensões de flexão do aço do mecanismo de aderência aço-concreto, que faz com que as tensões de tração do aço comprimam o concreto, ativando o mecanismo de atrito.

Figura 17 – Terceira variação do corpo de prova prismático do modelo *Push-off* (C3)



Fonte: Autor (2019).

Para garantir o cobrimento mínimo foram utilizados espaçadores plásticos. As formas e armaduras montadas com as três variações dos corpos de prova para o ensaio *Push-off* podem ser vistas no Apêndice A.

Dessa maneira, utilizando cada uma das dosagens de concreto foram moldados um corpo de prova para cada condição de armadura, totalizando 12 corpos de prova prismáticos do modelo *Push-off*.

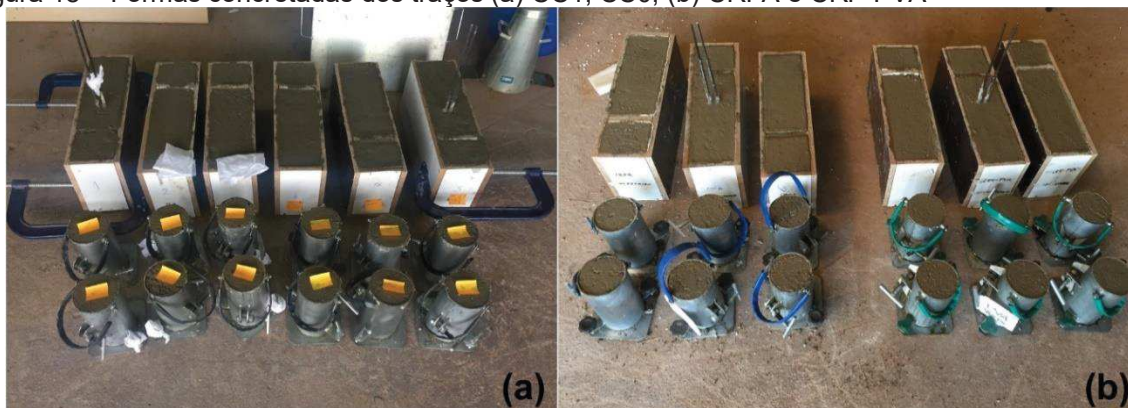
3.4 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Além dos três corpos de prova prismáticos para o ensaio de cisalhamento direto, foram moldados seis corpos de prova cilíndricos padrão (100 mm de diâmetro por 200 mm de altura) para cada um dos quatro traços, destinados aos ensaios de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, conforme NBR 5739 (ABNT, 2018), NBR 7222 (ABNT, 2011) e NBR 8522 (ABNT, 2017), respectivamente.

Para isso, foram produzidos 45 litros de concreto para cada traço utilizando uma betoneira de eixo inclinado, totalizando 180 litros de concreto, distribuídos em 12

corpos de prova prismáticos e 24 cilíndricos, conforme Figura 18. Em virtude da limitação com respeito à quantidade de formas, a concretagem foi realizada em dois dias distintos, com o intervalo de sete dias. As quantidades de materiais utilizados para a produção de cada um dos traços de concreto podem ser vistas na Tabela 4.

Figura 18 – Formas concretadas dos traços (a) CC1, CC0, (b) CRFA e CRF-PVA



Fonte: Autor (2019).

Tabela 4 – Quantidade de materiais utilizados para a produção de 45 litros de concreto

Traço	Cimento (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)	Areia (kg)	Água (L)	Fibras (kg)	Aditivo Superplastificante	
CC1	19.35	0.00	47.25	35.78	8.10	0.00	101.10 g	(0.52%)
CC0	19.35	47.25	0.00	35.78	8.10	0.00	355.00 g	(1.83%)
CRFA	19.35	47.25	0.00	35.78	8.10	1.80	357.60 g	(1.85%)
CRF-PVA	19.35	47.25	0.00	35.78	8.10	0.1125	358.60 g	(1.85%)

Fonte: Autor (2019).

O aditivo superplastificante foi dosado durante a produção dos traços com o objetivo de ajustar a trabalhabilidade do concreto, aferida de acordo com o teste de Slump, regido pela NBR NM 67 (ABNT, 1998).

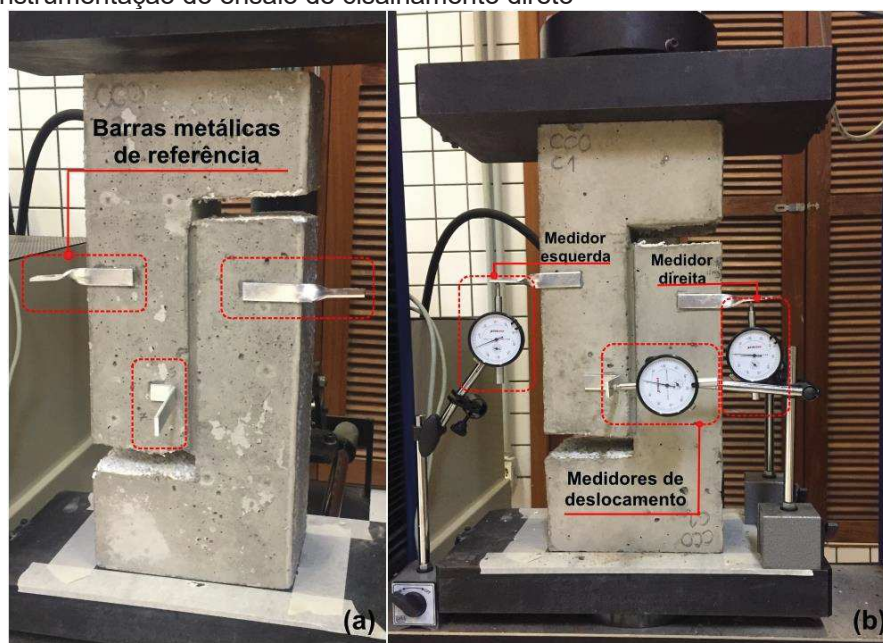
Todos os corpos de prova foram desmoldados e identificados 24 horas após a concretagem, sendo então submetidos ao processo de cura. Os 24 corpos de prova cilíndricos foram submetidos à cura em tanque de água e os doze corpos de prova prismáticos, destinados aos ensaios de cisalhamento direto, foram submetidos a cura ao ar livre em condições de temperatura média de 23,7 °C e umidade relativa do ar média de 50% até completarem 28 dias de idade.

3.5 INSTRUMENTAÇÃO E EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Transcorrido o período de cura, respeitando a diferença de idade entre as betonadas produzidas, foram realizados os ensaios de compressão axial, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade nos corpos de prova cilíndricos, e resistência ao cisalhamento nas peças prismáticas, segundo as normativas já citadas. Todos os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios do laboratório de Materiais de Construção Civil da UTFPR, campus Toledo.

O ensaio ocorreu com uma taxa de aplicação de carga de 0,5 mm/min e a medição da mesma foi realizada pela célula de carga da própria máquina de ensaios. Para medir o deslocamento vertical relativo e total da peça, bem como a abertura de fissuras, foram utilizados três extensômetros locados conforme Figura 19. Foram fixadas três barras metálicas no corpo de prova, que serviram como referência para a medição do deslocamento para cada um dos extensômetros, mantidos em posição fixa com o auxílio de bases magnéticas.

Figura 19 – Instrumentação do ensaio de cisalhamento direto



Fonte: Autor (2019).

A fim de correlacionar o aumento do deslocamento de cada um dos extensômetros com a evolução da aplicação de carga, os ensaios foram filmados com o auxílio de duas câmeras. Uma das câmeras foi destinada a filmar a leitura dos três extensômetros e a outra a acompanhar o incremento de carga da prensa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As propriedades mecânicas dos concretos medidas nos ensaios foram comparadas quanto às resistências à compressão, tração e módulo de elasticidade, obtidas com os corpos de prova cilíndricos; e às tensões de cisalhamento, deslocamentos verticais e horizontais obtidas com os corpos de prova prismáticos.

Assim sendo, os itens a seguir buscam apresentar os resultados obtidos e as análises realizadas com base no comparativo entre as dosagens realizadas e a bibliografia existente.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Como já citado anteriormente, os três agregados utilizados foram submetidos aos ensaios de caracterização. Suas curvas granulométricas podem ser vistas no Apêndice B e suas propriedades físicas constam na Tabela 5.

Tabela 5 – Caracterização dos agregados

Parâmetro	Areia	Brita 0	Brita 1
Módulo de Finura	2.12	-	-
DMC (mm)	-	9.52	19.1
Teor de Material Pulverulento	-	1.42%	1.53%
Massa específica seca (g/cm³)	2.71	3.07	3.05
Massa específica saturado superfície seca (g/cm³)	2.67	2.88	2.91
Massa específica (g/cm³)	2.64	2.79	2.84

Fonte: Autor (2019).

Conforme prescrição da normativa NBR NM 248 (ABNT, 2001) os teores de materiais pulverulentos foram utilizados no cálculo da composição granulométrica.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

O concreto foi caracterizado em seu estado fresco através do ensaio de *Slump Test* e no seu estado endurecido através da estimativa de suas resistências à compressão, tração e módulo de elasticidade, além dos ensaios de cisalhamento direto.

4.2.1 Propriedades do concreto no estado fresco

Em virtude do alto consumo de cimento e da baixa relação água/cimento, o traço inicial (CC1) já continha uma parcela de aditivo. O mesmo foi adicionado aos poucos durante a mistura dos componentes, visando ajustar a trabalhabilidade sem causar exsudação. Os resultados do *Slump test* para cada dosagem podem ser vistos na Tabela 6 e Figura 20.

Tabela 6 – Resultados da determinação da consistência através do *Slump test*

Traço	Abatimento do concreto (mm)	Teor de aditivo superplastificante (%)
CC1	148	0,52
CC0	70	1,83
CRFA	74	1,85
CRF-PVA	75	1,85

Fonte: Autor (2019).

Figura 20 – Ensaio do abatimento do tronco de cone para (a) CC1, (b) CC0, (c) CRFA e (d) CRF-PVA



Fonte: Autor (2019).

A ordem de produção dos concretos é a mesma presente em todas as tabelas, iniciando com o traço CC1. A ideia inicial era manter a mesma quantidade de aditivo em cada um dos traços, apenas ajustando a trabalhabilidade. A produção de CC1

exigiu 0,52% de aditivo superplastificante, quantidade menor que a presente no traço teórico. Durante a produção do CC0, foi inserida inicialmente a quantia de 0,52% de aditivo, entretanto a mistura ainda não possuía a consistência desejada, apresentando abatimento de 65 mm. A quantidade de aditivo foi aumentada, chegando até 1,83% com abatimento do tronco de cone de 70 mm. Devido à baixa variação da consistência e ao risco de exsudação, não foram adicionadas novas parcelas de aditivo.

Em virtude da adição de fibras, os traços CRFA e CRF-PVA possuíam menor trabalhabilidade em comparação aos dois primeiros traços. Controlando a consistência das duas dosagens, optou-se pela utilização da mesma parcela de aditivo superplastificante utilizada no traço CC0.

Um tópico interessante a se pontuar é o fato de que a brita 1 possuía maior teor de material pulverulento que a brita 0, entretanto a dosagem de CC1 utilizou menor quantidade de aditivo superplastificante e atingiu um valor de consistência superior ao dobro da consistência do traço CC0. A caracterização dos agregados envolve um processo de quarteamento, buscando representar a amostra como um todo. Possivelmente a quantia de brita 0 utilizada no traço CC0 possuía maior teor de material pulverulento que a média, fazendo com que a água de amassamento fosse, em sua maioria, absorvida pelo pó e não hidratasse corretamente a mistura, necessitando maiores parcelas de aditivo.

Tal suposição também é corroborada pelos resultados dos traços CRFA e CRF-PVA que, pela adição de fibras, deveriam apresentar valores de abatimento menores que o traço CC0, entretanto o contrário foi observado. Já quando comparados com o abatimento do traço CC1, os valores se mostram condizentes.

4.2.2 Propriedades do concreto no estado endurecido

Os ensaios de caracterização de cada um dos traços envolveram a estimativa da resistência média à compressão, tração e o módulo de elasticidade. Os corpos de prova tiveram sua altura estimada a fim de realizar as correções prescritas pela NBR 7680-1 (ABNT, 2015) e resultados obtidos constam na Tabela 7.

Tabela 7 – Propriedades características dos concretos

Traço	$f_{cm,k}$ (MPa)	$f_{tm,k}$ (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
CC1	48,55	4,18	36,6
CC0	52,10	4,42	37,6
CRFA	60,97	6,32	39,8
CRF-PVA	59,25	3,79	37,3

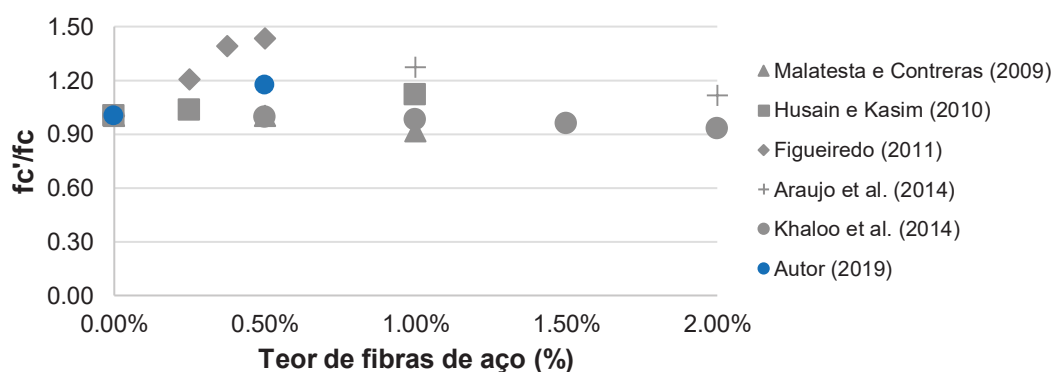
Fonte: Autor (2019).

Em relação ao número de corpos de prova, o módulo de elasticidade foi estimado com um, a resistência à tração por compressão diametral ($f_{tm,k}$) com dois e a resistência a compressão axial ($f_{cm,k}$) com quatro, sendo três diretamente e um através do ensaio de módulo de elasticidade, que também estima a resistência à compressão. Todos os resultados apresentaram valores próximos, com coeficiente de variação inferior à 5,0%, com exceção do $f_{cm,k}$ do traço CC0, que apresentou coeficiente de variação igual a 14,32%. Os resultados individuais dos corpos de prova podem ser vistos no Apêndice C.

Realizando uma análise inicial das propriedades básicas dos concretos pode-se notar que as resistências à tração e compressão dois traços convencionais (CC0 e CC1) se assemelham, apresentando pequena variação.

O traço com acréscimo de fibras de aço (CRFA) apresentou aumento em todas as suas propriedades. Em virtude da grande dispersão de resultados com concretos desse tipo, não existe um consenso sobre o real resultado da utilização desse material, ora a adição de fibras aumentando a resistência à compressão, ora diminuindo. A Figura 21 apresenta o resultado das pesquisas com CRFA sem armadura longitudinal de Malatesta e Contreras (2009), Husain e Kasim (2010), Figueiredo (2011), Araújo et al. (2014), Khaloo et al. (2014) e do presente trabalho.

Figura 21 – Resistências à compressão normalizadas em pesquisas envolvendo CRFA



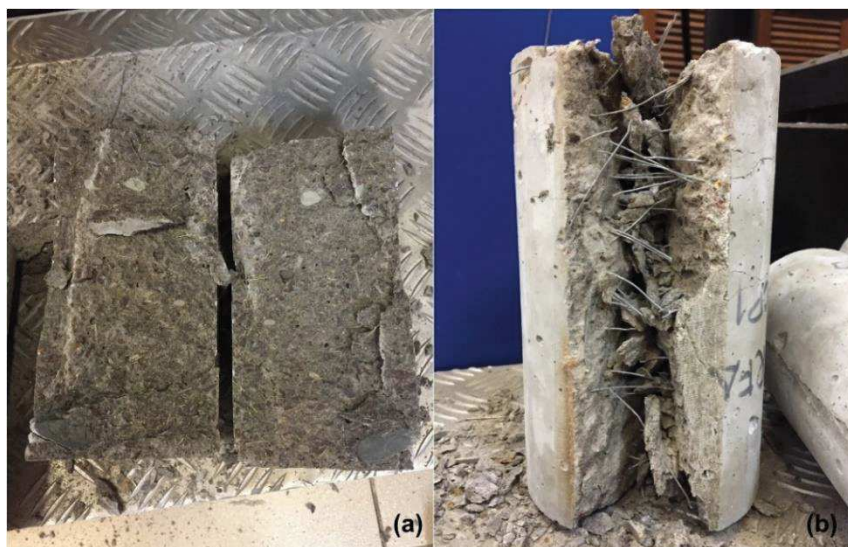
Fonte: Autor (2019).

No eixo das abcissas da Figura 21, f_c'/f_c corresponde a resistência à compressão do traço com fibras (f_c') dividido pela resistência à compressão do mesmo traço sem a adição de fibras (f_c). É possível notar que a dispersão dos resultados é grande e algumas pesquisas apresentam resultados discordantes das outras, como por exemplo: os resultados de Khaloo et al. (2014) demonstram que à partir de qualquer adição de fibras ocorre diminuição na resistência à compressão; já Araújo et al. (2014) observou que somente à partir de 1,00% de adição de fibras a resistência à compressão começa a ser prejudicada. Analisando os resultados no geral, é possível verificar que, para a maioria das pesquisas, existe um ponto de inflexão na curva de resistência à compressão x teor de fibras, correspondente ao teor de adição ótimo que maximiza a resistência à compressão. Logo, a quantidade utilizada no presente estudo não ultrapassou esse teor, fazendo com que o surgimento de vazios adicionais, localizados em volta das fibras, não conferisse ao concreto grande variação na sua compacidade, não interferindo negativamente na sua resistência.

O traço com acréscimo de fibras de PVA (CRF-PVA) apresentou um aumento na resistência à compressão e uma diminuição da resistência à tração. O aumento na resistência à compressão era previsto, de acordo com o trabalho de Arain et al. (2019), entretanto, com base nos resultados de outras variações de concretos reforçados com fibras, esperava-se um acréscimo na resistência à tração. A fibra sintética utilizada apresentou boa aderência à matriz cimentícia, mas provavelmente seu mecanismo de ancoragem, seu comprimento e/ou baixo teor de adição não foram suficientes para garantir um reforço eficaz à tração.

Um ponto interessante a ser mencionado é a situação dos corpos de prova submetidos aos ensaios de tração por compressão diametral. As peças de concreto convencional romperam completamente, ocasionando a separação das duas partes, enquanto as peças com reforço de fibras sofreram ruptura sem a separação das metades, conforme Figura 22.

Figura 22 – Corpos de prova dos traços (a) CCO e (b) CRFA após o ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: Autor (2019).

Portanto, uma parcela da resistência pode ser atribuída à ponte de transferência de tensões gerada pelas fibras. Além disso, o concreto sofreu ruptura, mas a força total de arrancamento das fibras não foi atingida.

4.3 RESISTÊNCIAS AO CISALHAMENTO

Após a realização do ensaio de cisalhamento, todas as interfaces cisalhadas foram medidas utilizando um paquímetro, a fim de determinar a área do plano de cisalhamento para o cálculo das tensões. Na Tabela 8 são apresentadas as áreas cisalhadas calculadas e as tensões de cisalhamento últimas.

Tabela 8 – Tensões cisalhantes últimas

Traço	Corpo de Prova	Área cisalhada (mm ²)	Tensão máxima (MPa)
CC1	CC1-C1	26380,50	4,42
	CC1-C2	24194,02	5,26
	CC1-C3	24168,00	4,06
CC0	CC0-C1	23642,55	5,08
	CC0-C2	23839,60	7,18
	CC0-C3	25800,00	5,37
CRFA	CRFA-C1	21432,74	6,25
	CRFA-C2	22890,00	8,99
	CRFA-C3	23326,00	8,14
CRF-PVA	CRF-PVA-C1	22684,57	4,92
	CRF-PVA-C2	23326,00	7,08
	CRF-PVA-C3	21735,00	5,81

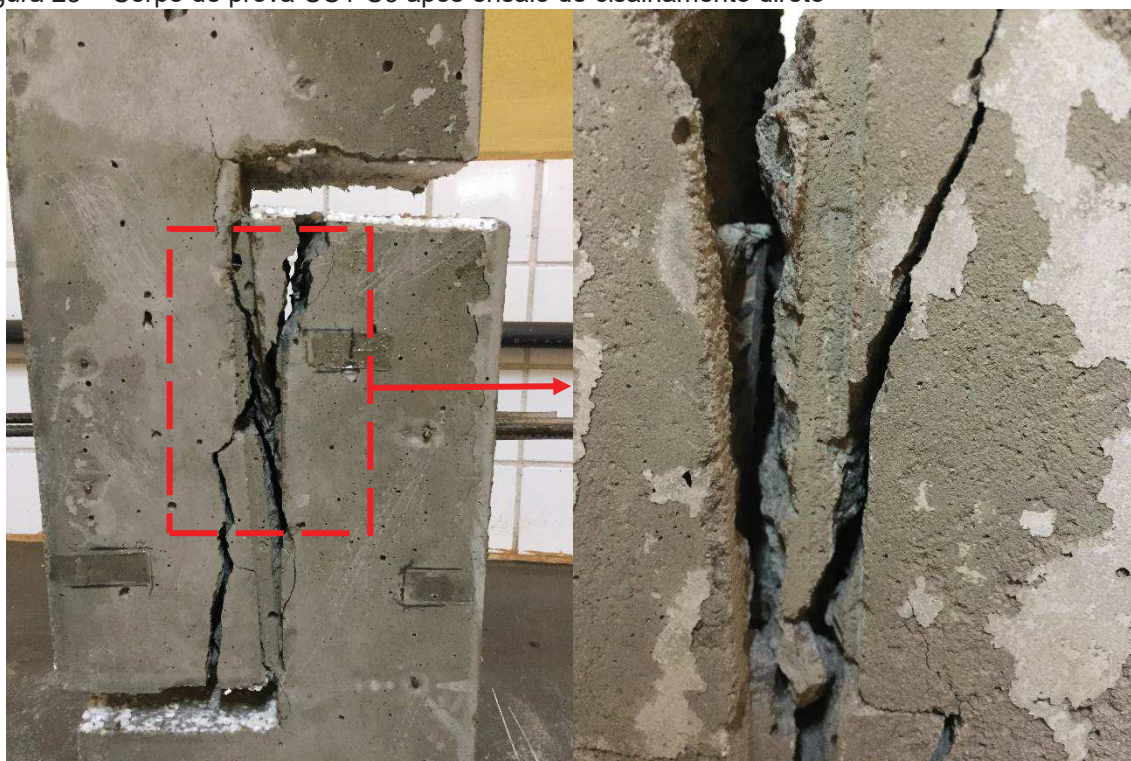
Fonte: Autor (2019).

Além dos modelos com adição de fibras, todos os corpos de prova da segunda variação de ensaio (C2, com a presença de estribo convencional) também apresentaram comportamento pseudo-dúctil, em virtude do escoamento das barras de aço. No momento de ruptura dos corpos de prova C1, apenas o engrenamento dos agregados atuava como mecanismo transmissor de tensões. Ao atingir a força máxima, ocorreu o encerramento de transferências de esforços por esse mecanismo, resultando na falha da peça. Já nos corpos de prova C2, ao ocorrer a quebra do mecanismo de engrenamento, o efeito de pino e/ou atrito continua absorvendo esforços, fazendo com que após a tensão máxima exista uma queda no gráfico, pois cada um dos mecanismos ainda atuantes sofre um acréscimo de carga a fim de compensar os já rompidos.

Partindo da ideia de ação dos mecanismos, esperava-se que os corpos de prova modelo C2 apresentassem maior resistência, em virtude da ação do engrenamento dos agregados, coesão, atrito e efeito de pino. Seguindo desse modelo, estariam os corpos de prova modelo C3, que não possuem a ação do atrito, e por fim o modelo C1, que não possui transferência por atrito nem efeito de pino. Tal hipótese não foi observada apenas no traço CC1, pois o corpo de prova CC1-C3 apresentou menor resistência do que o corpo de prova CC1-C1.

O corpo de prova CC1-C3 rompeu em uma interface diferente da proposta inicialmente, conforme Figura 23. A nova interface possui configuração ligeiramente diagonal, faceando longitudinalmente uma das armaduras de montagem, levando a diminuição da área de concreto e, conseqüentemente, diminuição na resistência ao cisalhamento.

Figura 23 – Corpo de prova CC1-C3 após ensaio de cisalhamento direto

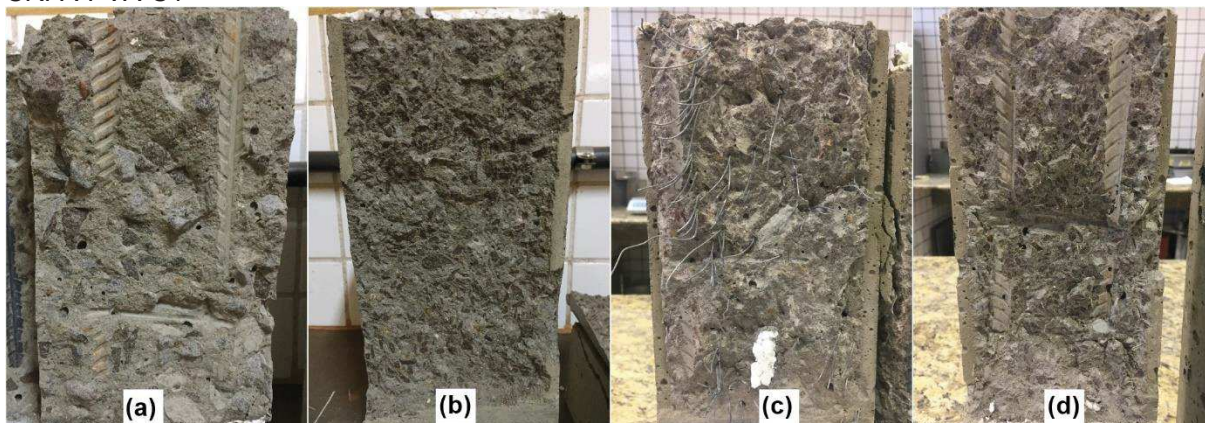


Fonte: Autor (2019).

De acordo com a bibliografia analisada, sabe-se que a DMC da brita tem grande influência no mecanismo de engrenamento dos agregados, pois interfere na rugosidade da superfície. Partindo desse pressuposto, esperava-se que a resistência dos corpos de prova do traço CC1 se mostrasse superior à do traço CC0. Tal fato não foi observado e não existem razões que permitam que algum fator seja apontado como causador dessa inconsistência. Entretanto, em vista do problema já apresentado no corpo de prova CC1-C3, é provável que a qualidade da brita 1 não estivesse no mesmo nível da brita 0, pois as resistências à compressão e à tração também se mostraram ligeiramente inferiores às do traço CC0.

Além disso, o acréscimo das fibras de PVA não garantiu ao material nenhum tipo de incremento na sua resistência ao cisalhamento, tal como na sua resistência à tração. Analisando a interface cisalhada do corpo de prova CRF-PVA-C1, vista na Figura 24-(d), é possível perceber que a presença das fibras era mínima quando comparada a interface cisalhada do corpo de prova CRFA-C1 (Figura 24-(c)).

Figura 24 – Interfaces cisalhadas dos corpos de prova (a) CC1-C1, (b) CC0-C1, (c) CRFA-C1 e (d) CRFA-PVA-C1



Fonte: Autor (2019).

De acordo com Arain et al. (2019) e Garcez (2009), a presença das fibras na interface, mesmo que mínima, deveria conferir ao concreto algum acréscimo em sua resistência. Portanto, a hipótese mais aceita nessa situação é que o comprimento da fibra utilizada, aliada ao seu fraco mecanismo de ancoragem, não foi suficiente para garantir o reforço necessário no quesito resistência ao cisalhamento.

É importante ressaltar que os corpos de prova de concreto convencional do modelo C1 (CC1-C1 e CC0-C1) apresentaram ruptura total do corpo de prova, tendo as interfaces completamente separadas. Já as interfaces dos corpos de prova com fibras (CRFA-C1 e CRF-PVA-C1) se mantiveram unidas, pois a carga de arrancamento total não foi atingida. A separação foi realizada com a aplicação de cargas posteriores à ruptura por cisalhamento.

Outrossim, partindo de uma análise visual dos corpos de prova prismáticos durante e após o ensaio, foi possível visualizar que, apesar da armadura de montagem ter sido executada com barras de 12,5 mm, ocorreu a formação de algumas fissuras devido a esforços de flexão em alguns exemplares, principalmente nos mais reforçados, conforme Figura 25. Esse esforço de flexão tende a rotacionar o corpo de prova.

Figura 25 – Fissuras geradas pela flexão no corpo de prova CC1-C2

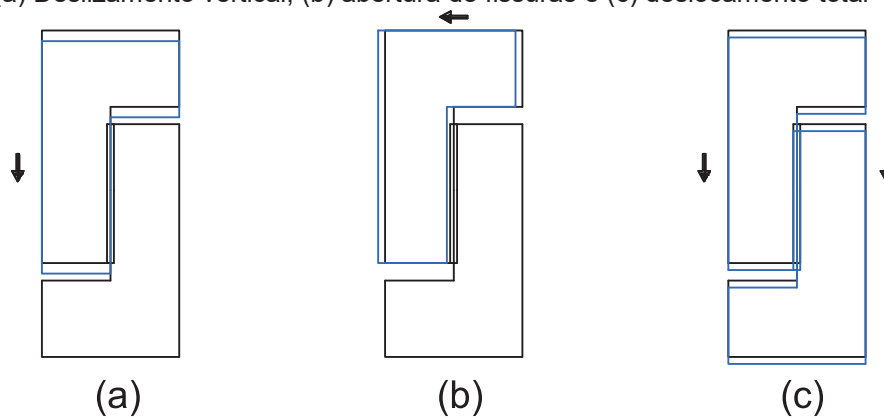


Fonte: Autor (2019).

4.4 DESLOCAMENTOS

A escolha da posição de cada um dos extensômetros, conforme apresentado na Figura 19, se deu para que, ao fim da coleta e análise de dados, três deslocamentos pudessem ser aferidos: o deslizamento vertical, a abertura de fissuras e o deslocamento total do corpo de prova, conforme Figura 26.

Figura 26 – (a) Deslizamento vertical, (b) abertura de fissuras e (c) deslocamento total

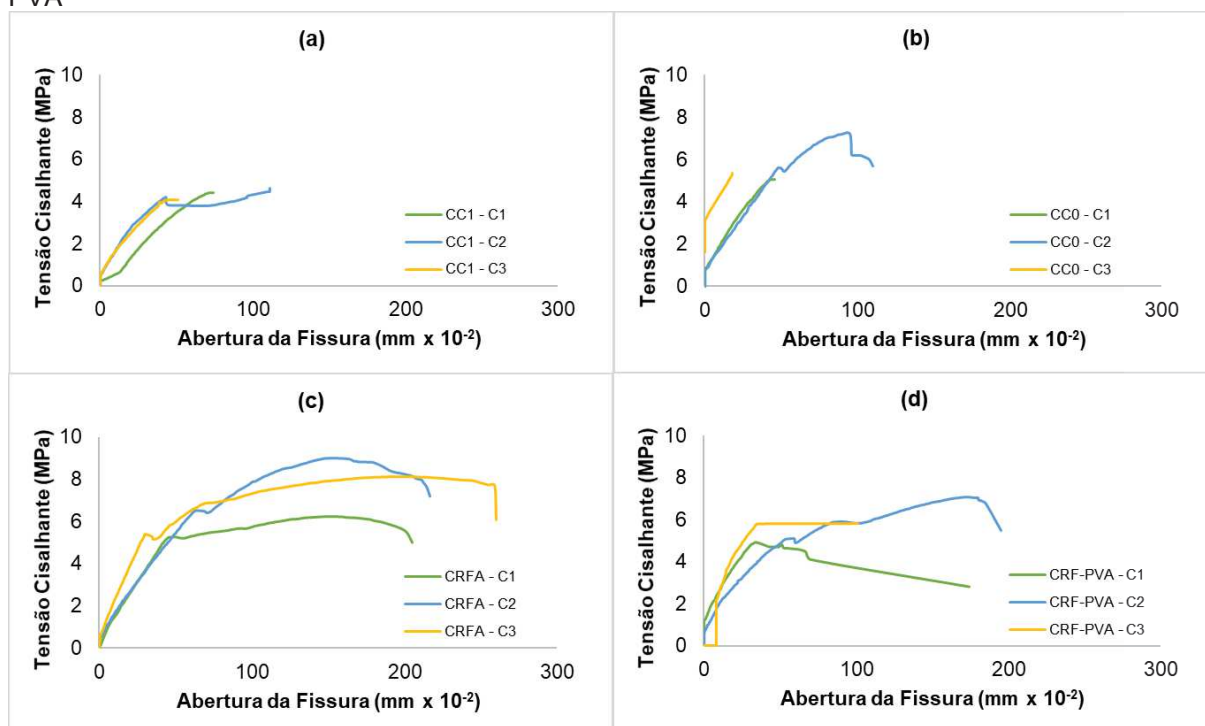


Fonte: Autor (2019).

A Figura 27 representa a curva de tensão cisalhante x abertura de fissuras. Destaca-se que a barra metálica de referência para medição do deslocamento horizontal do corpo de prova CC1-C2 sofreu um deslocamento durante a realização do ensaio, prejudicando as leituras realizadas a partir de 111×10^{-2} mm. Assim, as medições realizadas depois desse valor não foram inseridas no gráfico.

Realizando a análise de cada traço separadamente, é possível visualizar um padrão, sendo os corpos de prova com armadura convencional possuidores dos maiores valores finais de abertura de fissuras, decorrentes do comportamento pós-ruptura do concreto. Depois de atingir o pico, ocorre uma queda nos valores de tensão, em virtude do rearranjo dos mecanismos. Durante esse comportamento pseudo-dúctil do material, a largura das fissuras aumenta até o ponto de ruptura.

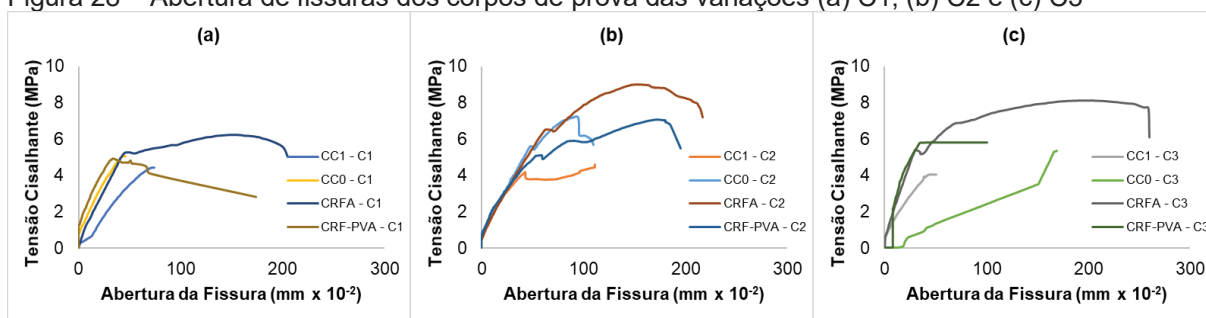
Figura 27 – Abertura de fissuras dos corpos de prova dos traços (a) CC1, (b) CC0, (c) CRFA e (d) CRF-PVA



Fonte: Autor (2019).

Além desse tipo de correlação, também é interessante a comparação em função da variação do corpo de prova, conforme Figura 28. Assim, é visível que a adição de fibras diminui a abertura de fissuras.

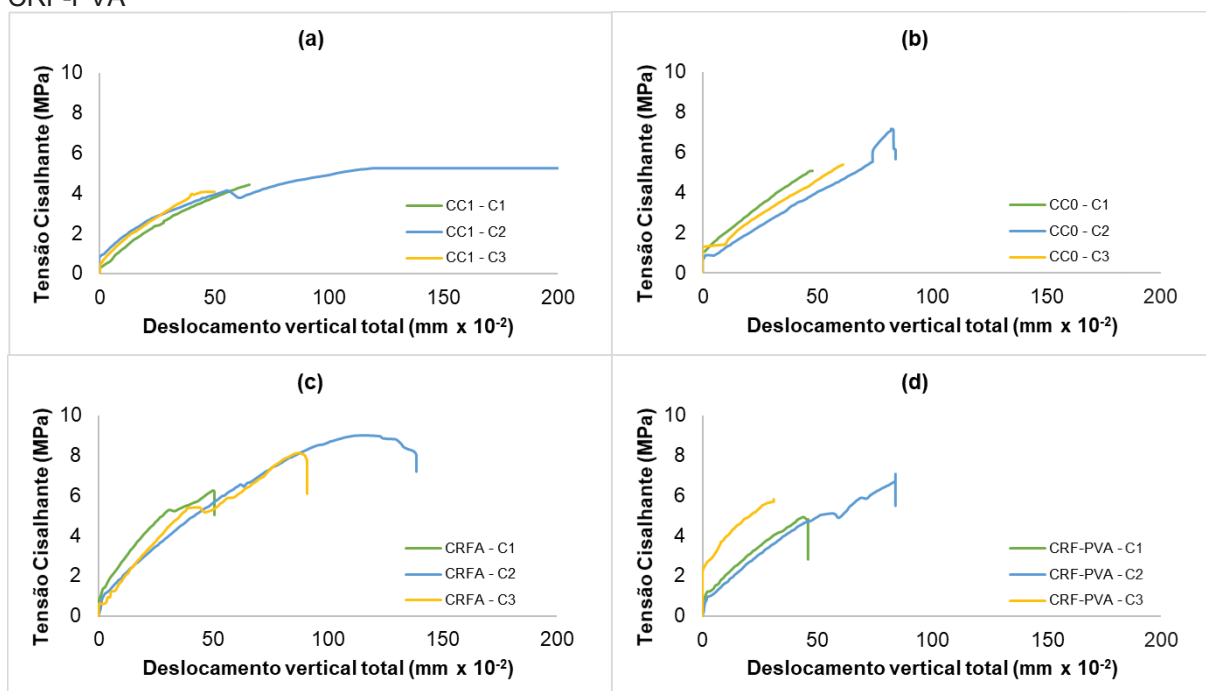
Figura 28 – Abertura de fissuras dos corpos de prova das variações (a) C1, (b) C2 e (c) C3



Fonte: Autor (2019).

Ao comparar a abertura de fissuras com o deslocamento total do corpo de prova, ilustrado na Figura 29, é possível visualizar que, na maioria dos corpos de prova, o início do deslocamento vertical ocorreu simultaneamente ao início do deslocamento horizontal (abertura de fissuras). Durante a aplicação das cargas iniciais, o material suporta toda tensão sem sofrer nenhum tipo de deslocamento, entretanto, com a ruptura da coesão, o corpo de prova perde essa propriedade e começa a sofrer deslocamentos verticais e horizontais.

Figura 29 – Deslocamento total dos corpos de prova dos traços (a) CC1, (b) CC0, (c) CRFA e (d) CRF-PVA

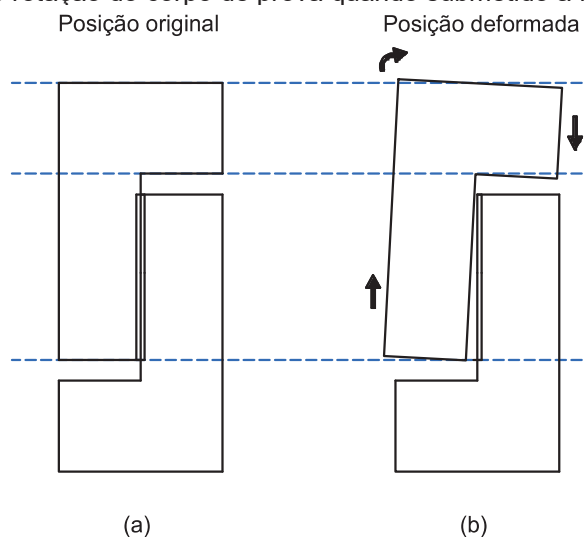


Fonte: Autor (2019).

O deslocamento total se manteve em um intervalo de 0,5 a 1,5 mm, com exceção do corpo de prova CC1 – C2. Já a abertura de fissuras dos corpos de prova com adição de fibras atingiu valores próximos à 2 mm.

A presença do medidor da esquerda e do medidor da direita permitiria a obtenção do deslizamento vertical. A coleta e tratamento de dados foi realizada, entretanto em função da forma anômala dos gráficos de deslocamento e da percepção visual da ação de esforços de flexão durante o ensaio de cisalhamento, os resultados obtidos com o medidor da esquerda foram desconsiderados para a presente análise, porém podem ser vistos no Apêndice D. Os esforços de flexão agem deformando o corpo de prova conforme Figura 30, pois a parte superior sofre uma tendência de giro no sentido horário, fazendo com que o ponto de referência do medidor da esquerda tenda a subir, afetando a leitura.

Figura 30 – Tendência de rotação do corpo de prova quando submetido à flexão



Fonte: Autor (2019).

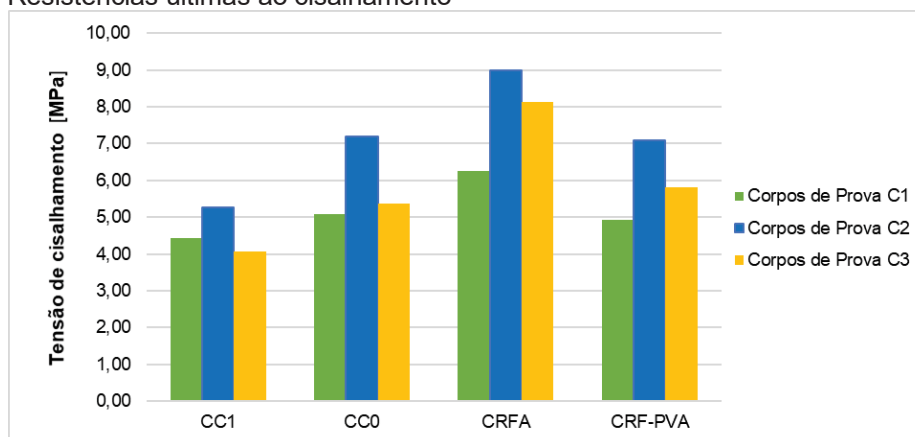
Nas referências bibliográficas consultadas, existem relatos de forte influência de flexão no ensaio *Push-off* em corpos de prova mais reforçados, com maior taxa de armadura longitudinal. Entretanto, nenhuma das pesquisas utilizou concretos com resistência a compressão superior a 50 MPa, já sendo classificados como concretos de alta resistência.

4.5 ANÁLISE DOS MECANISMOS

As resistências ao cisalhamento presentes na Tabela 8 foram representadas na Figura 31, para facilitar a discussão dos resultados. Vê-se que, para CC, a

presença da armadura sem aderência praticamente não garante nenhum incremento na resistência ao cisalhamento.

Figura 31 – Resistências últimas ao cisalhamento



Fonte: Autor (2019).

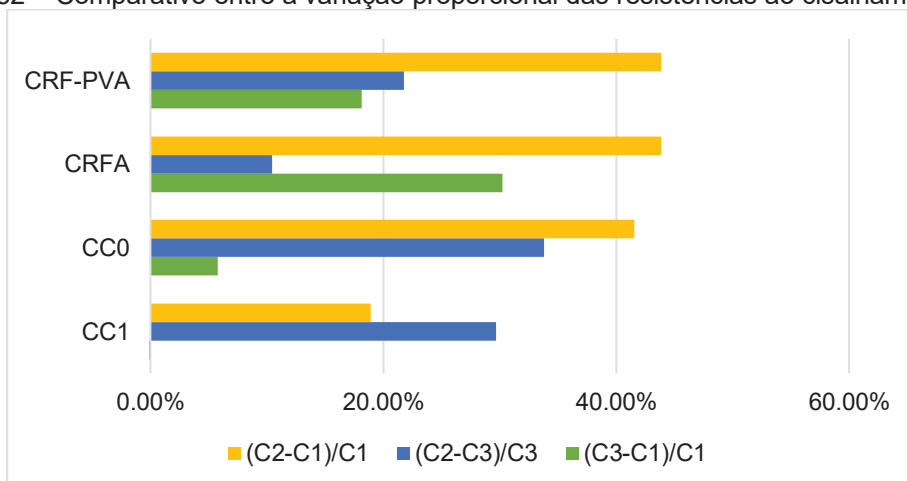
Apesar de diferentes resistências, em todos os traços com brita 0 é possível visualizar uma semelhança no comportamento dos três corpos de prova. Para averiguar se essa semelhança é válida numericamente, a Tabela 9 apresenta a variação proporcional das resistências para cada um dos traços estudados. Para facilitar a discussão, os resultados também estão apresentados na Figura 32.

Tabela 9 – Variação proporcional das resistências ao cisalhamento

Traço	C3-C1	C2-C3	C2-C1	(C3-C1)/C1	(C2-C3)/C3	(C2-C1)/C1
CC1	-0,37	1,20	0,84	-8,29%	29,68%	18,93%
CC0	0,29	1,82	2,11	5,79%	33,81%	41,55%
CRFA	1,89	0,85	2,74	30,24%	10,47%	43,88%
CRF-PVA	0,89	1,26	2,16	18,17%	21,75%	43,87%

Fonte: Autor (2019).

Figura 32 – Comparativo entre a variação proporcional das resistências ao cisalhamento



Fonte: Autor (2019).

Para a presente análise o traço CC1 será desconsiderado, em virtude dos resultados anômalos apresentados. A parcela (C3-C1)/C1 representa o acréscimo de resistência causado pelo efeito de pino isolado, apresentando variações distintas para cada um dos três traços. Nessa situação, a adição de fibras aumentou a resistência ao cisalhamento, atuando como ponte de transferência de tensões e não interferindo no efeito de pino, em virtude da presença da mangueira no corpo de prova C3.

A parcela (C2-C3)/C3 representa o acréscimo de resistência causado pelo atrito oriundo da aderência da barra de aço com o concreto. Nessa situação, a presença de fibras diminuiu a eficácia da ação do atrito em até três vezes para o CRFA. Araújo et al. (2013) realizou ensaios de arrancamento (*pull-out*), variando o diâmetro da barra e o teor de fibras, obtendo, nas piores condições, um decréscimo de 45% com respeito à resistência ao arrancamento e à tração de concretos reforçados com fibras de aço.

A presença das fibras de aço torna o concreto mais heterogêneo, afetando a adesão na zona de contato entre a barra e a matriz. Em um concreto convencional, os pontos de maior fragilidade são as zonas de transição agregado-matriz cimentícia e a zona de contato barra de aço–concreto. Já em concretos reforçados com fibras de aço, além dos aspectos já citados, cada uma das fibras possui também zona de transição própria que, dependendo do teor de adição, podem se sobrepor e/ou ficar muito próximas à barra de aço, afetando a aderência da mesma.

Por fim, a parcela (C2-C1)/C1 representa o acréscimo de resistência causado pela ação do efeito de pino com boas condições de aderência juntamente ao atrito. A mesma se mantém praticamente constante no concreto convencional e nos reforçados com fibras, atingindo cerca de 43%. Assim, as duas parcelas apresentadas anteriormente, com respeito a (C3-C1)/C1 e (C2-C3)/C3, acabam se compensando, fazendo com que a ação das fibras aumente a resistência ao cisalhamento apesar de interferir negativamente na aderência entre o aço e o concreto.

4.6 COMPARATIVO COM A BIBLIOGRAFIA

4.6.1 Tensões de cisalhamento normalizadas

Cada um dos traços de concreto apresentou uma resistência ao cisalhamento diferente, sendo função de diversos fatores. Para que se possa comparar as propriedades resistentes de um traço com o outro é necessário fazer uma padronização dos valores.

Alguns pesquisadores, como Walraven e Reinhart (1981), além de estabelecerem equações próprias para estimar a resistência ao cisalhamento de um traço, também propuseram algumas relações a fim relacionar a resistência à compressão com a resistência ao cisalhamento. Esse novo valor é chamado de tensão normalizada e é obtido a partir da Equação (9).

$$\tau_n = \frac{\tau_u}{\sqrt{f_{cm,k}}} \quad (9)$$

Onde:

τ_n – Tensão de cisalhamento normalizada;

τ_u – Tensão de cisalhamento última;

$f_{cm,k}$ – Resistência à compressão característica média;

Essa normalização foi aplicada nos resultados dos doze corpos de prova e pode ser vista na Tabela 10.

Tabela 10 – Tensão de cisalhamento normalizada

Corpo de Prova	Tensão de cisalhamento última (MPa)	Tensão de cisalhamento normalizada
CC1-C1	4,42	0,635
CC1-C2	5,26	0,755
CC1-C3	4,06	0,582
CC0-C1	5,08	0,703
CC0-C2	7,18	0,995
CC0-C3	5,37	0,744
CRFA-C1	6,25	0,800
CRFA-C2	8,99	1,151
CRFA-C3	8,14	1,042
CRF-PVA-C1	4,92	0,639
CRF-PVA-C2	7,08	0,920

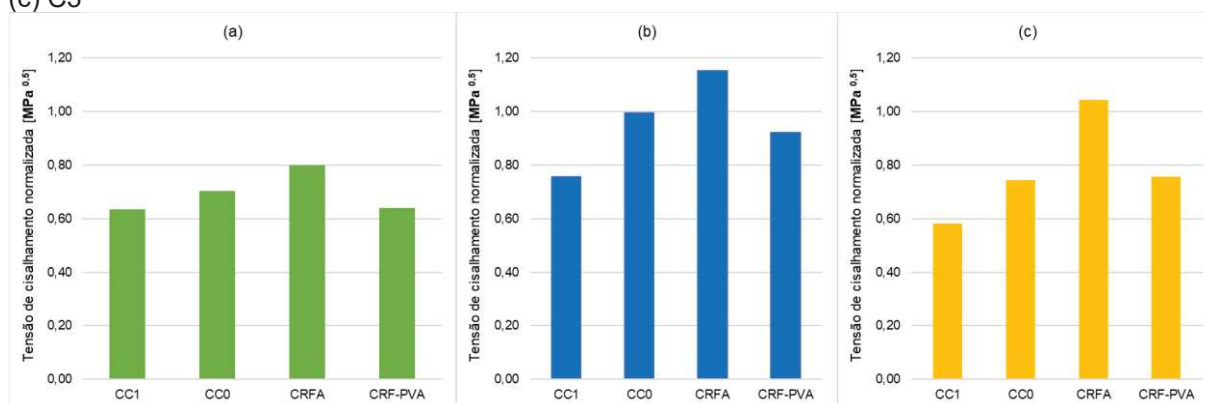
Continuação da Tabela 10 – Tensão de cisalhamento normalizada

CRF-PVA-C3	5,81	0,755
Média	6,047	0,810
Desvio Padrão	1,518	0,178
Coefficiente de variação	25,11%	22,03%

Fonte: Autor (2019).

Obviamente, por levar em consideração apenas aspectos intrínsecos do próprio concreto, tal normalização não pode ser aplicada em comparativos diretos sem alguns tipos de condicionantes. Se a análise for realizada separadamente, levando em consideração a taxa de armadura e a condição de aderência da mesma, os resultados passam a apresentar menores valores de dispersão, conforme Figura 33.

Figura 33 – Comparação entre as tensões normalizadas dos corpos de prova do tipo (a) C1, (b) C2 e (c) C3



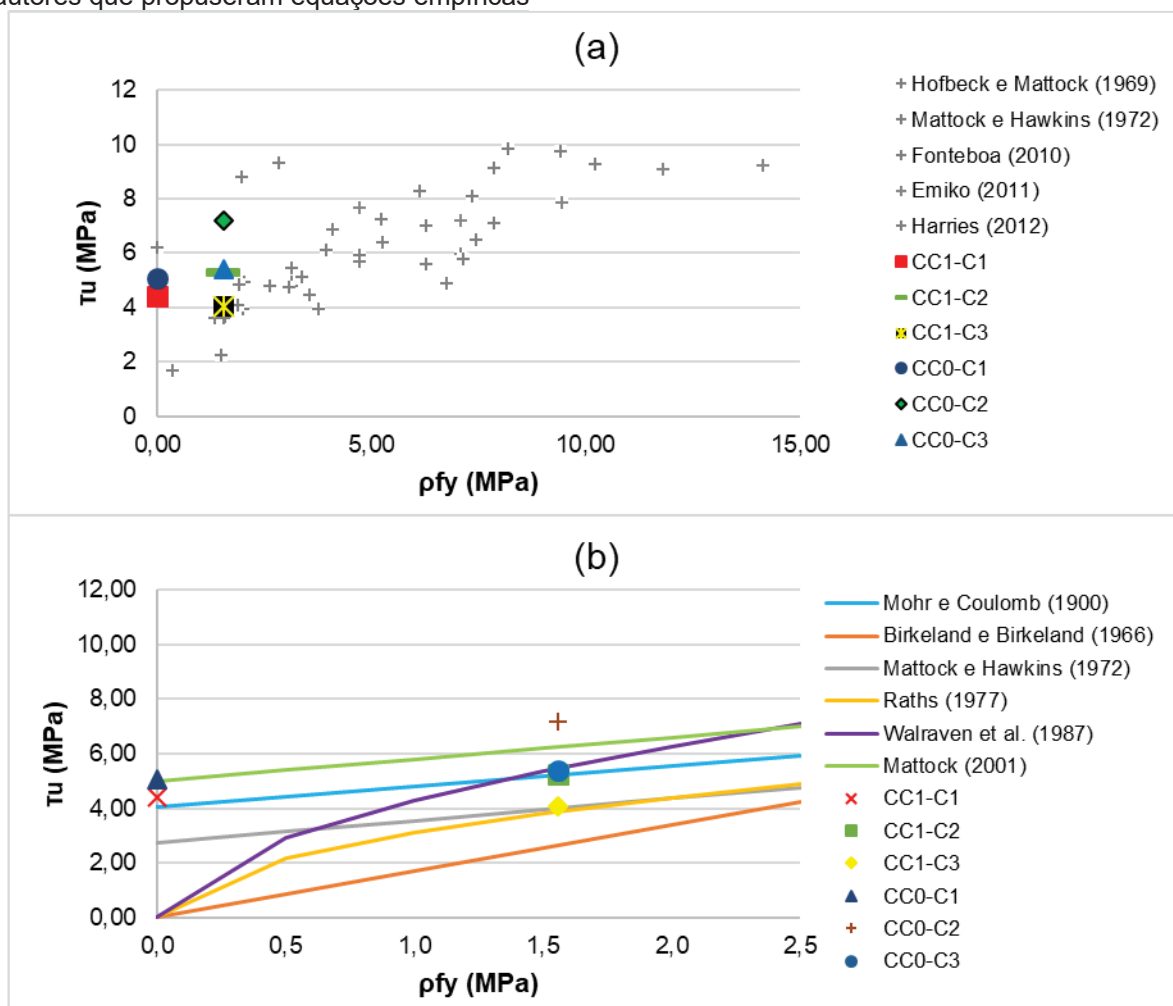
Fonte: Autor (2019).

Essa normalização consegue representar muito bem os concretos convencionais e o CRF-PVA que, como já discutido anteriormente, não conseguiu conferir um acréscimo de resistência ao concreto, mas também não afetou negativamente suas propriedades resistentes ao cisalhamento. Entretanto, o maior ponto de dispersão nos três comparativos é o concreto reforçado com fibras, que apresenta grande variabilidade na sua resistência à compressão em função do teor de fibras utilizado.

4.6.2 Comparativo com a bibliografia existente e equações empíricas para concretos convencionais

Em respeito a concretos convencionais, com a utilização ou não de estribos, a quantidade de pesquisas utilizando a metodologia *Push-off* é maior. Dessa maneira, plotando os resultados obtidos experimentalmente com os presentes na bibliografia e as equações empíricas, conforme Figura 34, é possível visualizar que os mesmos apresentam resultados coerentes, até mesmo os corpos de prova C3, que não possuíam a ação do atrito.

Figura 34 – Comparativo dos resultados com (a) autores que utilizaram a metodologia *Push-off* e (b) autores que propuseram equações empíricas



Fonte: Autor (2019).

As informações completas acerca dos materiais utilizados e resultados obtidos por cada um dos autores da Figura 34-(a) pode ser vista no Apêndice E.

Além da comparação gráfica, a Tabela 11 apresenta a estimativa da resistência ao cisalhamento com a utilização das equações empíricas. Para efeito de comparação, a resistência à compressão utilizada nos cálculos foi de 50 MPa, valor médio entre as resistências dos traços CC1 e CC0.

Tabela 11 – Tensões de cisalhamento últimas obtidas pelas equações empíricas e experimentalmente

Autor	Resistência ao cisalhamento τ_u (MPa)					
	CC1-C1	CC1-C2	CC1-C3	CC0-C1	CC0-C2	CC0-C3
Resistência experimental (2019)	4,42	5,26	4,06	5,08	7,18	5,37
Mohr e Coulomb (1900)	4,18	5,35	5,35	4,42	5,59	5,59
Birkeland e Birkeland (1966)	0,00	2,65	2,65	0,00	2,65	2,65
Mattock e Hawkins (1972)	2,76	4,01	4,01	2,76	4,01	4,01
Raths (1977)	0,00	3,88	3,88	0,00	3,88	3,88
Walraven et al. (1987)	0,00	5,40	5,40	0,00	5,59	5,59
Mattock (2001)	4,86	6,10	6,10	5,21	6,46	6,46
Média (MPa)	2,316	4,665	4,493	2,496	5,050	4,792
Desvio Padrão (MPa)	2,2597	1,1927	1,1790	2,4666	1,5973	1,3170
Coefficiente de variação (%)	97,55%	25,57%	26,24%	98,83%	31,63%	27,48%

Fonte: Autor (2019).

As fórmulas indicam a mesma resistência calculada para os corpos C2 e C3 pois não existe nenhuma consideração acerca das condições de aderência, por se tratar de uma situação não vista na prática.

Os coeficientes de variação apresentam valores altos, principalmente nos corpos de prova C1. Tal fato ocorre, pois, alguns autores e algumas normativas – como o Eurocode – consideram apenas a resistência da armadura, desconsiderando a parcela resistente do concreto (engrenamento dos agregados e coesão).

5 CONCLUSÕES

Após a realização de todos os ensaios propostos e da análise de resultados foi possível observar que apesar do aumento da bitola da armadura de montagem, os modelos *Push-off* sofreram ação significativa de flexão, interferindo nos deslocamentos medidos e não proporcionando um estado de cisalhamento puro. Entretanto, apesar da parcela de flexão, as resistências ao cisalhamento se mostraram coerentes às apresentadas na bibliografia.

A utilização da brita 1 não gerou um acréscimo na resistência ao cisalhamento como o esperado. A utilização de 0,5% de fibra de aço garantiu um bom reforço do concreto em todas as suas propriedades resistentes, fazendo com que o corpo de prova sem estribo (CRFA-C1) superasse as resistências do CC1-C2, que possuía estribo convencional, e do CC0-C3, que possuía estribo sem aderência.

A utilização da fibra de PVA KURALON™ RF400 não garantiu ao material reforço adequado quanto ao cisalhamento e a tração, provavelmente em virtude do seu comprimento limitado e de seu mecanismo de ancoragem ineficiente. Todavia, a fibra garantiu ao concreto um acréscimo na sua resistência à compressão e um comportamento pseudo-dúctil, conforme gráficos de abertura de fissuras e deslocamento total. Além disso, as duas fibras garantiram aos concretos menores deformações iniciais, antes de atingir o pico de tensão.

De acordo com as resistências obtidas e comparativos realizados, a adição de fibras interfere negativamente nas condições de aderência da armadura com o concreto. Entretanto, analisando o fenômeno globalmente, quando o mecanismo de efeito de pino atua junto com o atrito, o acréscimo de resistência das fibras compensa a diminuição de aderência da armadura, sendo a variação proporcional praticamente constante, tanto em concretos convencionais quanto reforçados com fibras.

Por fim, as seis equações empíricas para estimar a resistência ao cisalhamento do concreto retornam valores muito discrepantes entre si, chegando a atingir um coeficiente de variação de 98%. A equação proposta por Mattock (2001) é a que mais se assemelha com os resultados obtidos experimentalmente, apesar de não possuir nenhuma observação quanto à questão de aderência da armadura longitudinal.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a realização desse trabalho, notou-se a necessidade de mais ensaios com finalidade exclusiva de estudar o mecanismo de engrenamento, utilizando diferentes tipos e tamanhos de agregados, com maior controle acerca da rugosidade da superfície de ruptura.

Para as próximas pesquisas, sugere-se a utilização de fibras de PVA com maiores comprimentos, respeitando a orientação de tamanho existente para as fibras de aço. Podem ser analisados diversos teores de adição de fibras e até mesmo a utilização de fibras mistas.

Sugere-se a realização de mais corpos de prova *Push-off*, normais e pré-fissurados, a fim de garantir que o mecanismo de coesão seja rompido antes do início do teste efetivo de cisalhamento, separando o mesmo do mecanismo de engrenamento dos agregados. Ademais, sugere-se a utilização de outros ensaios de cisalhamento direto com esse mesmo traço, a fim de verificar se a parcela de flexão é minimizada.

Outrossim, as medições dos deslocamentos devem ser realizadas com LVDT ou outro mecanismo mais preciso. Para a abertura de fissuras, seria interessante a utilização de dois medidores, um na parte superior e outro na inferior, garantindo a existência ou não de flexão no corpo de prova.

Por fim, para saber exatamente a tensão na barra de aço longitudinal, bem como o momento em que atinge o escoamento e/ou plastificação, recomenda-se a utilização de *strain gauges*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLAH, S. et al. A. Bonding Mechanisms and Strength of Steel Fiber–Reinforced Cementitious Composites: Overview. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [s.l.], v. 30, n. 3, p.1-15, mar. 2018. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002154](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002154).

ACI COMMITTEE 318. **Building code requirements for structural concrete** (ACI 318-19) and commentary. ACI standard. American Concrete Institute, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 46**: Determinação do teor de material pulverulento. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 7680-1**: Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017

ARAIN, M. F. et al. Study on PVA fiber surface modification for strain-hardening cementitious composites (PVA-SHCC). **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 197, p.107-116, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.072>.

ARAÚJO, D. de L. et al. Resistência ao cisalhamento de vigas de concreto reforçadas com fibras de aço. **Acta Scientiarum. Technology**, [s.l.], v. 36, n. 3, p.389-398, 26 fev. 2014. Universidade Estadual de Maringá. <http://dx.doi.org/10.4025/actascitechnol.v36i3.19005>.

ARAÚJO, D. de L. **Cisalhamento na interface entre concreto pré-moldado e concreto moldado no local em elementos submetidos à flexão**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 1997.

ARAÚJO, D. L. et al. Influência da adição de fibras de aço na tensão de aderência de barras de aço retilíneas. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [s.l.], v. 6, n. 2, p.307-338, abr. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952013000200008>.

BENTUR A.; MINDESS, S. **Fiber Reinforced Cementitious Composites**. New York: Taylor & Francis, 2007.

BIRKELAND, P. W., BIRKELAND, H. W. Connections in Precast Concrete Construction. **ACI Journal Proceedings**, vol. 63, n. 3, 1966. *Crossref*, doi:10.14359/7627.

CÁCERES, A. R. E. et al. Geometric characterization of polymeric macrofibers. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [s.l.], v. 8, n. 5, p.644-668, out. 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952015000500006>.

CAPUTO, H. P. **Tensões e Deformações. Elasticidade, Plasticidade e Reologia**. Mecânica dos Solos e Suas Aplicações - Fundamentos, v.1, 6ª ed., capítulo 10, Rio de Janeiro – RJ: LTC (Livros Técnicos e Científicos), 1988.

EMIKO, L. et al. Shear transfer in lightweight concrete. **Magazine Of Concrete Research**, [s.l.], v. 63, n. 6, p.393-400, jun. 2011. Thomas Telford Ltd. <http://dx.doi.org/10.1680/mac9.00162>.

EUROCODE 2: Design of Concrete Structures. Part 1-2: General Rules and Rules for Buildings, 2004.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto Reforçado com Fibras. 2011. 256 f. Tese (Livre-Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia Civil, 2011.

FISSET, M.; BASTIEN, J.; MITCHELL, D. Shear strengthening of concrete members with unbonded transverse reinforcement. **Engineering Structures**, [s.l.], v. 180, p.40-49, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.008>.

FONTEBOA, B. G. et al. Cortante-fricción de los hormigones reciclados. **Materiales de Construcción**, [s.l.], v. 60, n. 299, p.53-67, 10 ago. 2010. Departamento de Publicaciones del CSIC. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2010.49708>.

GARCEZ, E. O. **Investigação do comportamento de Engineered Cementitious Composites reforçados com fibras de polipropileno como material para recapeamento de pavimentos**. 2009. 194 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2009.

GHASEMI, M.; GHASEMI, M. R.; MOUSAVI, S. R. Investigating the effects of maximum aggregate size on self-compacting steel fiber reinforced concrete fracture parameters. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 162, p.674-682, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.141>.

GRZYMSKI, F.; MUSIAŁ, M.; TRAPKO, T. Mechanical properties of fibre reinforced concrete with recycled fibres. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 198, p.323-331, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.183>.

HARRIES, K. A et al. Toward an Improved Understanding of Shear-Friction Behavior. **ACI Structural Journal**, [s.l.], November-December, p. 835-844, 2012

HOFBECK, J. A., IBRAHIM, I. O., MATTOCK, A. H. Shear transfer in reinforced concrete. **Journal of the American Concrete Institute**, v. 66, n. 13, p. 119-128, 1969.

HUBER, T.; HUBER, P.; KOLLEGGER, J. Influence of aggregate interlock on the shear resistance of reinforced concrete beams without stirrups. **Engineering Structures**, [s.l.], v. 186, p.26-42, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.074>.

HUSAIN, H. M.; KASIM, M. Experimental Study in Direct Shear Strength of Fiber Reinforced Concrete. **Journal of Kirkuk University – Scientific Studies**, v. 5, N. 1, p.17-34, October 2010.

JSCE-SF6, Japan Society of Civil Engineers. **Method of test for shear strength of steel fiber reinforced concrete**. Tokyo; 1990.

JUDICE, F. M. de S. **Comportamento da ligação entre lajes e vigas pré-fabricadas feita com nichos preenchidos no local**. 2002. 383 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

KAUFMANN, W. et al. Shear transfer across cracks in steel fibre reinforced concrete. **Engineering Structures**, [s.l.], v. 186, p.508-524, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.02.027>.

KHALOO, A.R.; KIM, N. Influence of concrete and fiber characteristics on behavior of steel fiber reinforced concrete under direct shear. **ACI Materials Journal**. v. 94. p. 592-601, 1997.

KHALOO, A. et al. Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 51, p.179-186, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.054>.

KHANLOU, A et al. **Shear performance of steel fibre-reinforced concrete**. Steel Innovations Conference, Christchurch, New Zealand. 21-22 de February, 2013.

KURARAY™. **Catálogo Técnico**. Disponível em: <
<https://www.kuraray.com.br/produtos/kuralon/kuralon-k-ii-fibra-de-pva>>. Acesso em: 02 de mai.de 2019.

LI, V. C. From micromechanics to structural engineering. **Doboku Gakkai Ronbunshu**, [s.l.], n. 471, p.1-12, 1993. Japan Society of Civil Engineers. http://dx.doi.org/10.2208/jscej.1993.471_1.

LIN, F.; GUO, J. Shear transfer of concrete strengthened using bolted steel plates. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 212, p.109-120, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.220>.

LOOV, R. E.; PATNAIK, A. K. Horizontal shear strength of composite concrete beams with a rough interface. **PCI Journal**, January-February, p. 228-235, 1992.

MALATESTA, S. C.; CONTRERAS, M. C. Comportamento ao corte de cisalhamento do concreto armado com fibras de aço. Universidade Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile. **Revista Ingeniería de Construcción**, v. 24, n. 1, abril 2009.

MATTOCK, A. H. Shear friction and high-strength concrete. **ACI Structural Journal**, v.98, n.º 1, p. 50–59, 2001.

MATTOCK, A. H.; HAWKINS, M. N. Shear transfer in reinforced concrete – Recent research. **PCI Journal**, March-April, p. 55-75, 1972.

MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. 201 f. Tese de Doutorado (Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica - RJ, Rio de Janeiro, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MUKHOPADHYAY, S.; KHATANA, S. A review on the use of fibers in reinforced cementitious concrete. **Journal Of Industrial Textiles**, [s.l.], v. 45, n. 2, p.239-264, 7 abr. 2014. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/1528083714529806>.

PUFAL, K. M. **Comparativo da resistência ao cisalhamento direto entre concretos autoadensável e convencional**. 2017. 69 f. TCC (Graduação) - Curso

de Engenharia Civil, Coeci, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2017.

RAHAL, K.; ALREFAEI, Y. Shear strength of recycled aggregate concrete beams containing stirrups. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 191, p.866-876, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.023>.

RANDL, Norbert. Design Recommendations for Interface Shear Transfer in Fib Model Code 2010. **Structural Concrete**, vol. 14, no 3, setembro de 2013, p. 230–41. Crossref, doi:10.1002/suco.201300003.

RATHS, C. H. Reader Comments on “Designs Proposals for Reinforced Concrete Corbels” by A.H. Mattock. **PCI Journal**, vol. 22, nº 2, pp. 93-98, 1977.

RUIZ, M. F.; MUTTONI, A.; SAGASETA, J. Shear strength of concrete members without transverse reinforcement: A mechanical approach to consistently account for size and strain effects. **Engineering Structures**, [s.l.], v. 99, p.360-372, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.05.007>.

SAVARIS, G. **Resistência ao Cisalhamento do Concreto Autoadensável**. 2016. 248 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2016.

SOETENS, T.; MATTHYS, S. Shear-stress transfer across a crack in steel fibre-reinforced concrete. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 82, p.1-13, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.05.010>.

SOLTANI, M.; ROSS, B. E. Database Evaluation of Interface Shear Transfer in Reinforced Concrete Members. **ACI Structural Journal**, [s.l.], v. 114, n. 2, p.249-281, mar. 2017. American Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.14359/51689249>.

VEDACIT. **Catálogo Técnico**. Disponível em: <<http://www.vedacit.com.br/uploads/biblioteca/manual-tecnico-vedacit-5.pdf>>. Acesso em: 30 de Ago.de 2019.

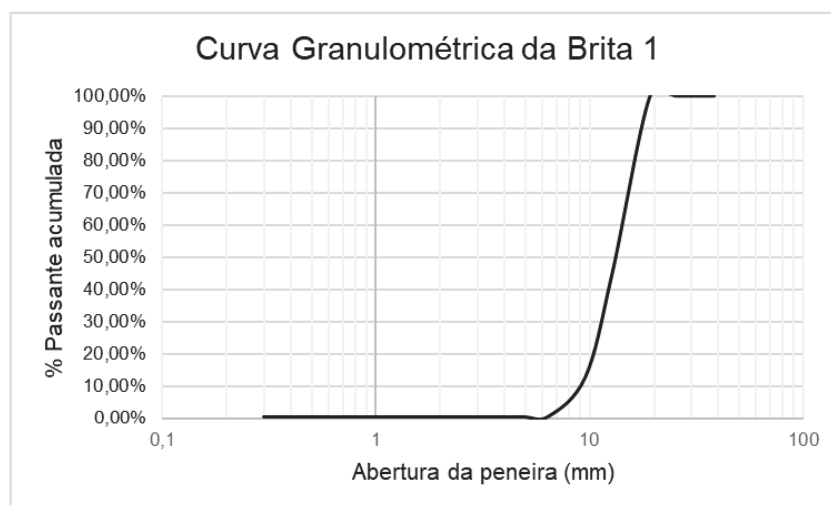
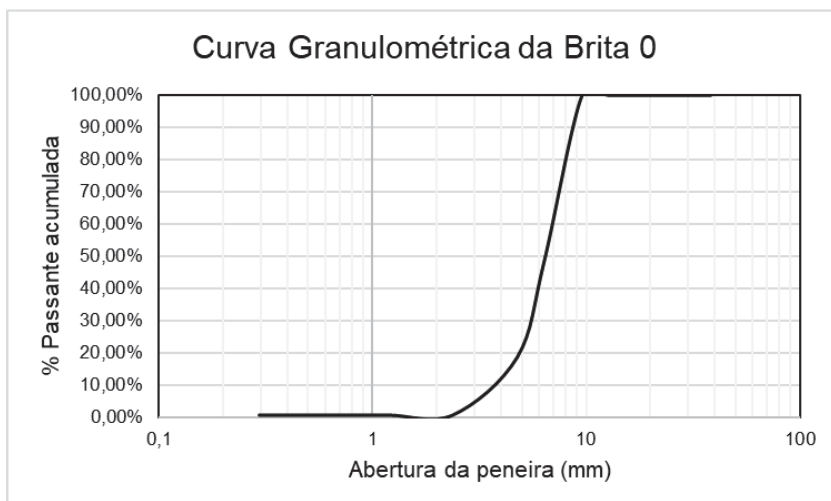
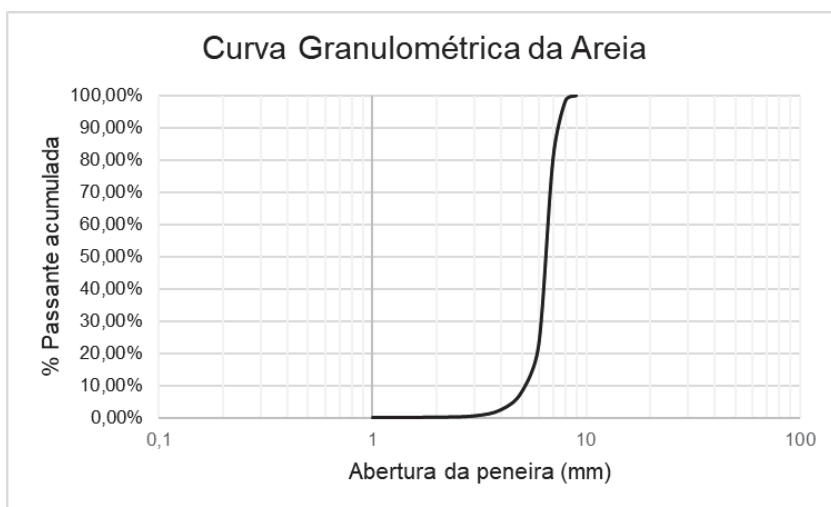
VITOR, P. de C. P.; SANTOS, A. C. dos; TRAUTWEIN, L. M. Resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado sem armadura transversal reforçadas com fibras de aço. **Ambiente Construído**, [s.l.], v. 18, n. 3, p.255-270, set. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000300280>.

WALRAVEN, J.; FRÉNAY, J.; PRUIJSSERS, A. Influence of concrete strength and load history on the shear friction capacity of concrete members. **PCI Journal**, p. 66-84, January/February, 1987.

WALRAVEN, J. C; REINHARDT, H. W. Theory and experiments on the mechanical behaviour of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading. **HERON**, v 26, n. 1A, p. 1-68, 1981.

WIRAND®. **Catálogo Técnico**. Disponível em:
<<http://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/maccaferri/wirand.pdf> >. Acesso em: 01 de
mai.de 2019.

APÊNDICE A – FORMAS E ARMADURAS DAS TRÊS VARIAÇÕES *PUSH-OFF*

APÊNDICE B – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS

APÊNDICE C – RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL E TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Tabela 12 – Resultados individuais dos ensaios de compressão axial

Traço	Corpo de Prova	Tensão máxima (MPa)	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
CC1	CP1	49,11	48,55	1,23	2,54%
	CP2	46,84			
	CP3	48,57			
	CP4	49,70			
CC0	CP1	55,90	52,10	7,46	14,32%
	CP2	44,09			
	CP3	60,51			
	CP4	47,90			
CRFA	CP1	62,55	60,97	1,24	2,03%
	CP2	59,52			
	CP3	60,89			
	CP4	60,90			
CRF-PVA	CP1	61,62	59,25	2,92	4,93%
	CP2	55,99			
	CP3	60,14			
	CP4	58,70			

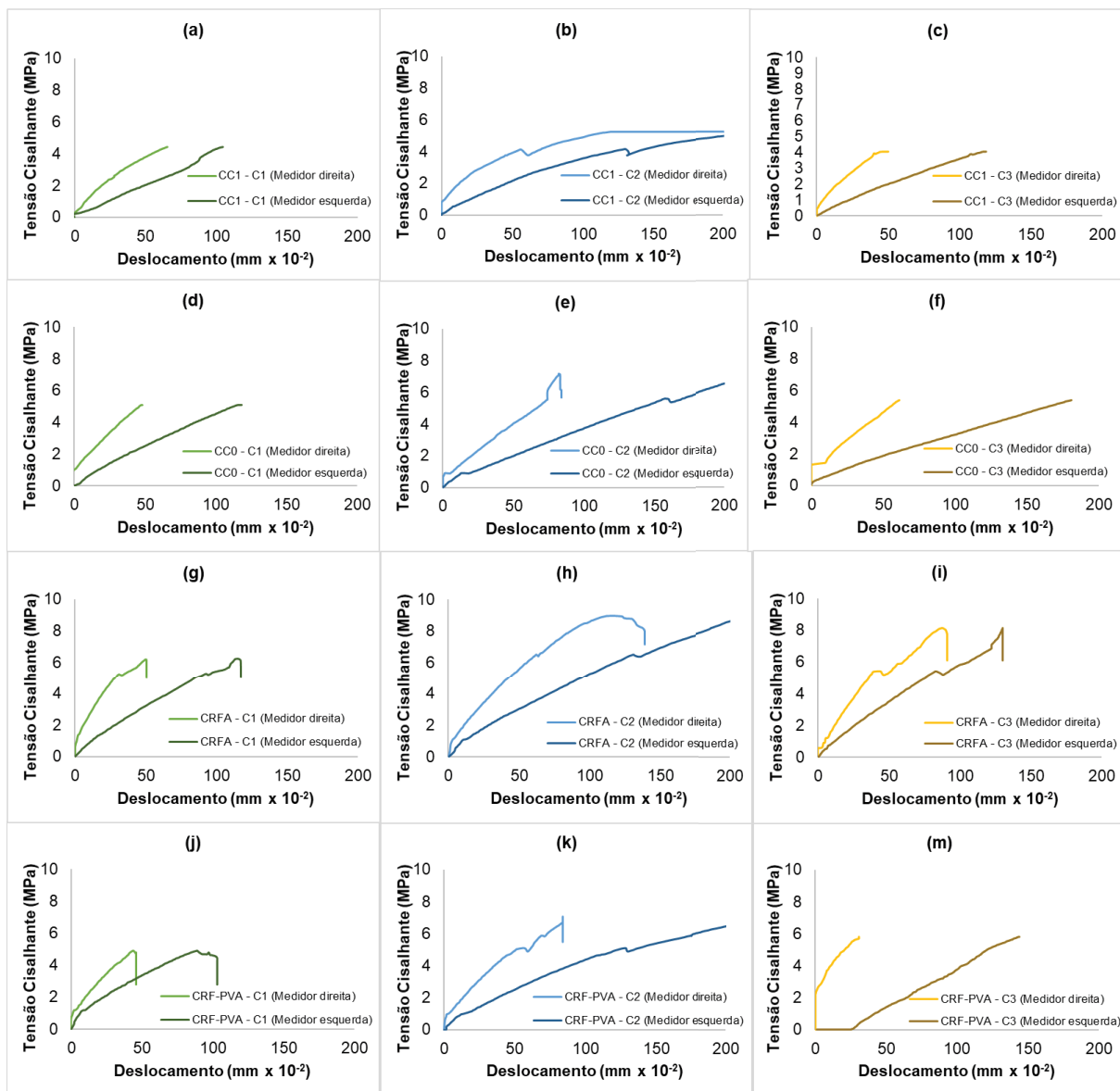
Fonte: Autor (2019).

Tabela 13 – Resultados individuais dos ensaios de tração por compressão diametral

Traço	Corpo de Prova	Tensão máxima (MPa)	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
CC1	CP1	4,32	4,18	0,20	4,82%
	CP2	4,04			
CC0	CP1	4,50	4,42	0,12	2,68%
	CP2	4,34			
CRFA	CP1	6,19	6,32	0,19	3,06%
	CP2	6,46			
CRF-PVA	CP1	3,73	3,79	0,08	2,02%
	CP2	3,84			

Fonte: Autor (2019).

APÊNDICE D – LEITURAS DE DESLOCAMENTO DO MEDIDOR DA ESQUERDA E DO MEDIDOR DA DIREITA



APÊNDICE E – INFORMAÇÕES DETALHADAS DOS TESTES INCLUÍDOS NA AVALIAÇÃO COMPARATIVA

Autor	Ensaio	Tipo de Concreto	Corpo de Prova	Dimensão Agregado	f_c (MPa)	Plano de cisalhamento			Área de aço			V_u (kN)	τ_u (MPa)
						b (mm)	d (mm)	A (mm ²)	A_s (mm ²)	ρ_s (%)	f_y (MPa)		
Emiko (2011)	Push-off	CC	CC1-A	L600	33,00	300,00	120,00	36000,00	471,24	1,31%	540,00	214,92	5,97
		CC	CC2-A	L800	37,20	300,00	120,00	36000,00	314,16	0,87%	540,00	276,12	7,67
			CC2-B	L800	37,20	300,00	120,00	36000,00	471,24	1,31%	540,00	259,92	7,22
			CC2-C	L800	37,20	300,00	120,00	36000,00	628,32	1,75%	540,00	283,68	7,88
			CC2-D	L800	37,20	300,00	120,00	36000,00	785,40	2,18%	540,00	327,60	9,10
			CC2-E	L800	37,20	300,00	120,00	36000,00	942,48	2,62%	540,00	331,56	9,21
Fonteboa (2010)	Push-off	CC	CC-A	4-12/12-25 (Naturais)	37,87	100,00	100,00	10000,00	0,00	0,00%	500,00	62,18	6,22
			CC-B	4-12/12-25 (Naturais)	37,87	100,00	100,00	10000,00	39,27	0,39%	500,00	88,00	8,80
			CC-C	4-12/12-25 (Naturais)	37,87	100,00	100,00	10000,00	56,55	0,57%	500,00	93,26	9,33
Harries (2012)	Push-off	CC	CC-A	25 mm	29,54	406,40	254,64	103483,66	425,81	0,41%	464,03	499,46	4,83
			CC-B	25 mm	29,54	406,40	259,08	105290,11	425,81	0,40%	464,03	428,33	4,07
			CC-C	25 mm	29,54	406,40	261,94	106451,40	774,19	0,73%	424,04	506,45	4,76
			CC-D	25 mm	29,54	406,40	257,97	104838,50	774,19	0,74%	424,04	571,06	5,45
			CC-E	25 mm	29,54	406,40	250,03	101612,70	425,81	0,42%	896,35	399,35	3,93
			CC-F	25 mm	29,54	406,40	255,11	103677,21	425,81	0,41%	868,77	464,66	4,48
			CC-G	25 mm	29,54	406,40	257,97	104838,50	774,19	0,74%	965,30	607,20	5,79
			CC-H	25 mm	29,54	406,40	255,11	103677,21	774,19	0,75%	905,31	507,55	4,90
Hofbeck e Mattock (1969)	Push-off	CC	CC2.1	22 mm	21,80	254,00	127,00	32258,00	141,76	0,44%	357,00	133,87	4,15
			CC2.2	22 mm	21,80	254,00	127,00	32258,00	283,53	0,88%	357,00	154,19	4,78
			CC2.3	22 mm	27,50	254,00	127,00	32258,00	425,29	1,32%	357,00	190,64	5,91
			CC2.4	22 mm	27,50	254,00	127,00	32258,00	567,06	1,76%	357,00	226,77	7,03
			CC2.5	22 mm	29,40	254,00	127,00	32258,00	708,82	2,20%	357,00	295,16	9,15
			CC2.6	22 mm	29,40	254,00	127,00	32258,00	850,59	2,64%	357,00	314,52	9,75

Hofbeck e Mattock (1969)	Push-off	CC	CC3.1	22 mm	28,40	254,00	127,00	32258,00	32,17	0,10%	352,00	54,52	1,69
			CC3.2	22 mm	28,20	254,00	127,00	32258,00	128,68	0,40%	400,00	118,06	3,66
			CC3.3	22 mm	21,80	254,00	127,00	32258,00	283,53	0,88%	357,00	154,19	4,78
			CC3.4	22 mm	28,40	254,00	127,00	32258,00	506,71	1,57%	332,00	233,23	7,23
			CC3.5	22 mm	28,40	254,00	127,00	32258,00	794,23	2,46%	298,00	261,61	8,11
		CC	CC4.1	22 mm	28,60	254,00	127,00	32258,00	141,76	0,44%	465,00	159,68	4,95
			CC4.2	22 mm	28,60	254,00	127,00	32258,00	283,53	0,88%	465,00	222,26	6,89
			CC4.3	22 mm	30,50	254,00	127,00	32258,00	425,29	1,32%	465,00	267,74	8,30
			CC4.4	22 mm	30,50	254,00	127,00	32258,00	567,06	1,76%	465,00	317,74	9,85
			CC4.5	22 mm	23,90	254,00	127,00	32258,00	708,82	2,20%	465,00	299,35	9,28
		CC	CC5.1	22 mm	17,20	254,00	127,00	32258,00	141,76	0,44%	357,00	115,81	3,59
			CC5.2	22 mm	18,40	254,00	127,00	32258,00	283,53	0,88%	357,00	158,71	4,92
			CC5.3	22 mm	16,80	254,00	127,00	32258,00	425,29	1,32%	357,00	183,87	5,70
			CC5.4	22 mm	18,20	254,00	127,00	32258,00	567,06	1,76%	357,00	180,32	5,59
			CC5.5	22 mm	18,40	254,00	127,00	32258,00	708,82	2,20%	357,00	229,03	7,10
		CC	CC6.3	22 mm	27,90	254,00	127,00	32258,00	141,76	0,44%	338,00	72,58	2,25
			CC6.4	22 mm	27,70	254,00	127,00	32258,00	708,82	2,20%	338,00	209,35	6,49
Mattock e Hawkins (1972)	Pull-off	CC	8.1	22 mm	33,44	305,00	121,00	36905,00	283,53	0,77%	341,30	177,36	4,81
			8.2	22 mm	35,30	305,00	121,00	36905,00	425,29	1,15%	341,30	225,96	6,12
			8.3	22 mm	34,82	305,00	121,00	36905,00	567,06	1,54%	341,30	235,38	6,38
			8.4	22 mm	37,30	305,00	121,00	36905,00	128,68	0,35%	386,12	132,57	3,59
			8.5	22 mm	34,96	305,00	121,00	36905,00	193,02	0,52%	386,12	145,55	3,94
			8.6	22 mm	35,16	305,00	121,00	36905,00	321,70	0,87%	386,12	189,83	5,14